

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Máster en Ingeniería Acústica



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Diseño e Implementación de un Theremin Digital”

Tipología: Trabajo de investigación

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Autor: ***Víctor Enrique Dávila Briones***

Tutor: ***José Francisco Toledo Alarcón***

GANDIA, 2015

This book belongs to the very few. Perhaps none of them are even alive yet. Maybe they are the ones who will understand my *Zarathustra*. There are ears to hear some people -but how could I ever think there were ears to hear me? -My day won't come until the day after tomorrow. Some people are born posthumously.

Friedrich Nietzsche.

Una vez más

A mi hermano

Carlos

“Diseño e Implementación de un Theremin Digital”

Autor: Víctor Enrique Dávila Briones

Tutor: José Francisco Toledo Alarcón

Resumen — Este trabajo presenta el diseño e implementación de un theremin digital, controlado mediante sensores de ultrasonidos y con toda la electrónica integrada en un procesador digital de señales DSP de Analog Devices; alejándonos de este modo de los clásicos diseños analógicos basados en tubos de vacío y posteriormente en transistores. Tomando como punto de partida un diseño previo del autor que combinaba sensores de ultrasonidos con microcontroladores de 8 bits, se pretende conseguir un instrumento musical tanto más liviano como potente.

Palabras clave: theremin, sensor de ultrasonidos, procesador digital de señales, instrumento musical electrónico.

Abstract — This work presents the design and implementation of a digital theremin, controlled by ultrasonic sensors and implemented on an Analog Devices Digital Signal Processor. In this way we supersede the classic analog designs. This work continues an earlier design by the author which combined ultrasonic sensors and 8-bit microcontrollers, and so we intend to get a more compact and powerful musical instrument.

Keywords: theremin, ultrasonic sensor, digital signal processor, electronic musical instrument.

ÍNDICE

I. Descripción de la Tesis	7
I.1. Introducción	7
I.2. Objetivo	10
I.3. Justificativa	11
I.4. Antecedentes	11
I.5.Descripción del Theremin Digital	12
II. Herramientas Electrónicas	14
II.1. Módulo Sensor de Ultrasonidos	14
II.1.1. Introducción	14
II.1.2.Características del Producto	14
II.1.3. Conexión Eléctrica	15
II.1.4. Principio de Operación	15
II.2. Microcontrolador PIC16F84A	17
II.3. Procesador de Audio SIGMADSP	18
II.4. SigmaStudio	20
II.5. Buffer Triestado 74LVC126AD	22
II.6. Software de Diseño “EAGLE”	23
II.7. Software de Diseño “FREECAD”	25
III. Theremin	26
III.1. Introducción	26
III.2. Funcionamiento	28
III.3. Theremin: Reseña Histórica	29
III.4. El Theremin Transistorizado de R.A. Moog	33
III.4.1. Producción del Sonido y Control del Tono	36
III.4.2. Control del Volumen y Control del Timbre	36
IV. Etapa de Desarrollo	38
IV.1. Diagrama de Bloques del Theremin Digital	38
IV.2. Placa Sensor	39
IV.3. Sensor y Microcontrolador	42
IV.4. Placa Interfaz (y Fuente de Alimentación)	47

IV.5. Placa DSP	50
IV.6. Síntesis de la Señal de Audio	54
IV.7. Diseño de la Estructura Mecánica del Theremin Digital	62
V. Conclusiones	65
V.1. Trabajos Futuros	66
Agradecimientos	70
Referencias de figuras y tablas	71
Bibliografía	75

I. DESCRIPCIÓN DE LA TESIS

I.1. INTRODUCCIÓN

La Acústica es la rama de la Física que estudia el sonido en todos sus aspectos y facetas. Se ocupa de la producción, propagación, registro y reproducción del sonido, de los instrumentos y aparatos para su medición, de la naturaleza del proceso de audición, etc. Como rama de la Física, la Acústica culminó su desarrollo en el siglo XIX gracias a los trabajos de Hermann Von Helmholtz y de Lord Rayleigh, y sus bases teóricas han permanecido prácticamente sin cambios desde fines de aquel siglo. No obstante, el progreso de la Acústica ha sido constante durante todo el siglo XX desde el punto de vista técnico, especialmente en lo referente a sistemas para el registro y la reproducción del sonido.

El médico y físico alemán Hermann von Helmholtz (1821-1894) con su obra *“Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik”* (“Sobre las sensaciones de tono como base fisiológica para la teoría musical”), demostró que el sonido musical podía ser analizado mediante unos cuantos principios físicos básicos. Mostró que la calidad o timbre de un tono dependía de la intensidad, orden y número de armónicos presentes en la nota. Una sola nota musical no era tan simple después de todo. Helmholtz demostró que en realidad consiste de un tono base o fundamental acompañado por vibraciones relacionadas, llamadas armónicas, sobre el tono de la fundamental, lo cual crea el timbre o color del tono. El timbre es lo que distingue el sonido de un violín del sonido de un piano, aunque ambos instrumentos estén tocando la misma nota. Cada instrumento exhibe su propia mixtura única de armónicos. Esta teoría sugirió que el sonido podía ser analizado por sus partes componentes.

Entender los tres componentes básicos del sonido [1] es especialmente pertinente para la música electrónica porque los compositores y músicos están frecuentemente trabajando con control directo sobre estos componentes que son:

- **Tono.** La frecuencia de un sonido. Específicamente es el número de vibraciones por segundo, los cuales, cuando están en el rango audible, son detectados como un cierto tono. En música electrónica, este tono se vuelve audible como una expresión de la corriente eléctrica alterna que es usada para vibrar el cono de un altavoz a cierta tasa por segundo.
- **Timbre.** La naturaleza o cualidad de un sonido, conocido también como color del tono. Timbre es lo que distingue a los sonidos de diferentes instrumentos musicales cuando tocan la misma nota. Por lo general las ondas de sonido son complejas y contienen más de una simple frecuencia o tono fundamental. Estas ondas adicionales reciben el nombre de parciales, sobretonos, armónicos y transitorios. Si un tono o fundamental predomina,

entonces el sonido puede ser relacionado a una nota en la escala musical. Cuando existe mayor competencia en la dominancia o hay muchos grupos complejos de sobretonos presentes, un sonido puede tomar alta densidad y características inusuales.

- **Volumen.** La amplitud del sonido. El volumen es transmitido por un altavoz según la distancia que avance y retroceda el cono desde su posición neutral. Esto difiere de la frecuencia, la cual determina la rapidez de vibración del cono del altavoz pero no la potencia con que vibra. Con instrumentos acústicos, la amplitud es controlada por el intérprete al tocar más suave o más fuerte: presionando la tecla, soplando la corneta, moviendo las cuerdas, etc. En música electrónica, la amplitud es controlada por la potencia eléctrica de un amplificador que hace audibles a los sonidos producidos electrónicamente. A su vez, el volumen está relacionado con la **Duración** (el tramo de tiempo durante el cual es audible un sonido). Los instrumentos acústicos tienen una capacidad limitada para mantener los sonidos. El piano incluso fue diseñado con un pedal especial dedicado exclusivamente a alargar la duración de su sonido. Los instrumentos electrónicos tienen la capacidad innata de mantener un sonido indefinidamente, haciendo de la duración un elemento principal en la composición. Del mismo modo, la duración está cercanamente relacionada con los principios de la **Envolvente del sonido**, el cual comprende las características de Attack, Decay, Sustain y Release [2] de un sonido (la forma en que inicia, se mantiene y acaba). Esto es esencialmente la forma de las características de amplitud de un sonido y ocurre a través del tiempo. Attack se refiere al tiempo que toma un sonido (cuando inicia) en alcanzar su máximo volumen. Decay es el tiempo que emplea un sonido en caer de su volumen máximo. Sustain es el nivel de la secuencia principal de duración de un sonido. Release es el tiempo que emplea un sonido en caer y acabar. Visualmente la forma de la envolvente es como una rampa que sube, disminuye su nivel y luego baja nuevamente. En música electrónica la envolvente de una onda sonora puede ser controlada con gran precisión.

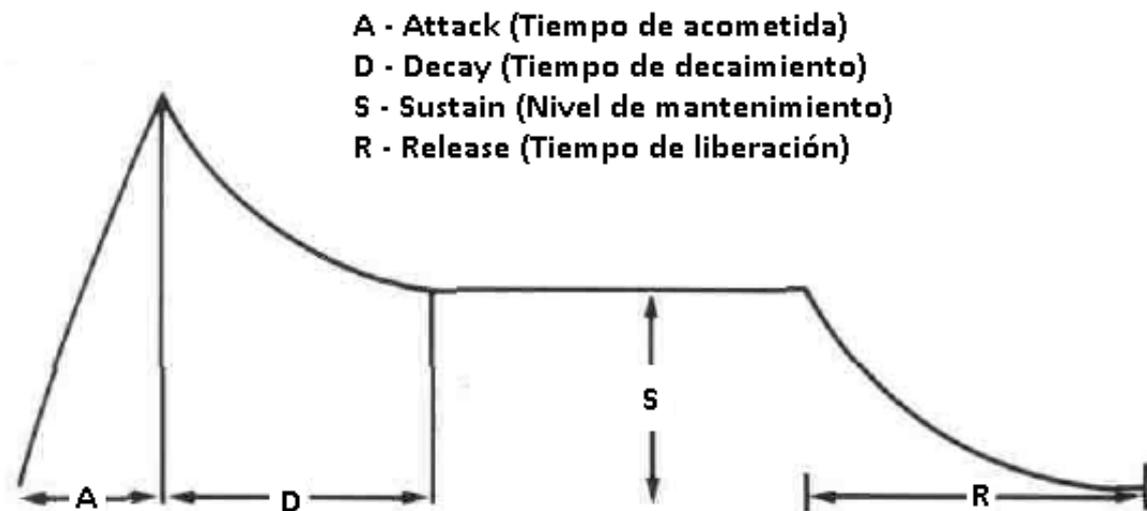


Fig. 1.1. Envolvente de una onda sonora.

Las ondas sonoras pueden ser representadas gráficamente por sus dos características básicas: **tono y volumen**.

La distancia que una onda cubre durante el tiempo que emplea en completar un ciclo es conocida como **longitud de onda**, y el número de ciclos que son hechos cada segundo es conocido como **frecuencia** (su unidad es llamada hertz o Hz). No obstante, la velocidad a la cual la onda se mueve a través del aire (V) es fija, así que hay una relación directa entre la longitud de onda (L) y la frecuencia (f):

$$L=V/f$$

Es decir, la longitud de onda es igual a la distancia que recorre el sonido en un segundo, dividida entre el número de ciclos por segundo de ese sonido.

En música electrónica el **tono** está referido a la **frecuencia**. Un sonido de baja frecuencia tendrá una forma de onda larga y un tono bajo. Mientras más alta sea la frecuencia, la forma de onda será más corta y más alto será el tono. El **volumen** de un sonido es su **amplitud**. En el diagrama de una onda, la amplitud se representa como la altura de esa onda.

Un **tono complejo** se compone de varias ondas de sonido. Tendrá una frecuencia **fundamental** y bandas laterales adicionales o **sobretonos**. La fundamental es la onda con la frecuencia más baja o la amplitud más alta y así domina la combinación de tonos. Los sobretonos agregan **color** al sonido, dándole **carácter** o **timbre**.

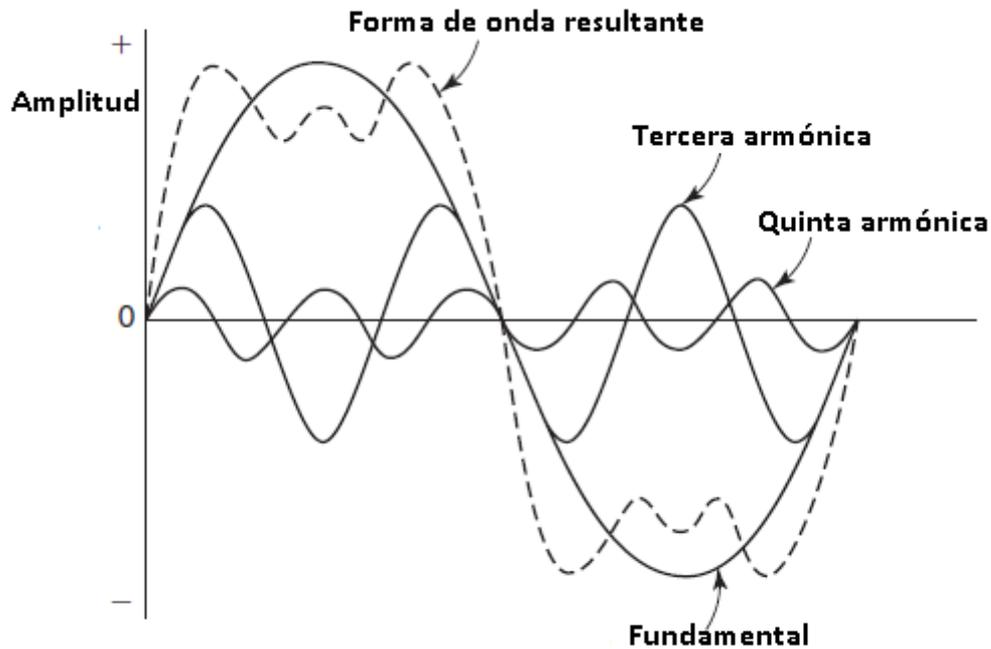


Fig. 1.2. Construyendo una onda cuadrada a partir de ondas senoidales armónicas.

1.2. OBJETIVO

El presente trabajo tiene como principal objetivo diseñar e implementar una versión digital del clásico theremin analógico, integrando en un procesador digital de señales (DSP, por sus siglas en inglés) toda la electrónica -con excepción de los sensores de ultrasonidos- necesaria para controlar y sintetizar el sonido producido por este querido instrumento musical.

Además, presenta como objetivos específicos:

- Estudio y aplicación de sensores de ultrasonidos.
- Estudio y aplicación del procesamiento digital de señales acústicas.
- Conseguir un instrumento musical tanto más liviano como potente.

I.3. *JUSTIFICATIVA*

Emplear una tecnología relativamente nueva es hoy en día una de las mayores ventajas en cuanto al desarrollo de una aplicación. Por eso es muy importante el estudio de las nuevas tecnologías de la electrónica en su aplicación en el audio. Los dispositivos electrónicos han ido cambiando en el transcurso de los años: de los tubos de vacío pasamos a los transistores y ahora estamos en la era de los procesadores digitales de señales. Cada uno de estos dispositivos ofrece características distintas que les otorgan ciertas ventajas con respecto a sus antecesores.

Así, este trabajo de investigación pretende emplear los dispositivos electrónicos más modernos para obtener un diseño propio del primer instrumento musical electrónico de la historia: el theremin.

I.4. *ANTECEDENTES*

Esta tesis ha tomado como referencias principales:

El diseño para Theremin de su creador, el ingeniero ruso Lev Termen, que se observa en: "RCA Theremin Service Notes", Radio-Victor Corporation of America, 1929.

El diseño para Theremin construido en forma transistorizada por el Dr. Robert Moog, y rebautizado como ETHERWAVE, que se observa en la hoja de datos del producto:

“Understanding, customizing and hot-rodding your Etherwave Theremin”

(2003) Moog Music Inc.

El diseño para Theremin de la Universidad de Glasgow, rebautizado como THE GLASGOW DIGITAL THEREMIN, publicado en Noviembre del 2003; el cual incluía muchos circuitos integrados analógicos en el diseño.

El diseño para Theremin realizado por el autor para su tesis de grado, presentado a la Facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (Lima, Perú) en el año 2013. Dicho diseño empleaba sensores de ultrasonidos con microcontroladores de 8 bits como reemplazo de las antenas y osciladores de alta frecuencia analógicos discretos de los diseños clásicos citados arriba.

I.5. DESCRIPCIÓN DEL THEREMIN DIGITAL

El funcionamiento de un theremin controlado por ultrasonidos es bastante similar al clásico theremin controlado por radiofrecuencia, reemplazando las antenas de este último por dos sensores de ultrasonidos para medición de distancias. De la misma manera al theremin clásico, acercando o alejando las manos a los sensores es como se controla el volumen y el tono de la señal de audio.

Acercando una mano hasta casi tocar el sensor de volumen no escucharemos ningún sonido, mientras alejándola directamente irá aumentando el volumen hasta un nivel máximo. Acercando la mano al sensor de tono la señal de audio tendrá una frecuencia cada vez más alta y aguda; mientras que alejando directamente la mano, la frecuencia irá volviéndose más baja y grave.

Dichos sensores de ultrasonidos serán controlados por una tarjeta electrónica, la cual también se encargará de la síntesis o generación de la señal de audio.

Finalmente, un amplificador de potencia de audio a la salida del dispositivo aumentará el nivel de potencia de la señal de audio, que se convertirá en potencia acústica a la salida de los altavoces.

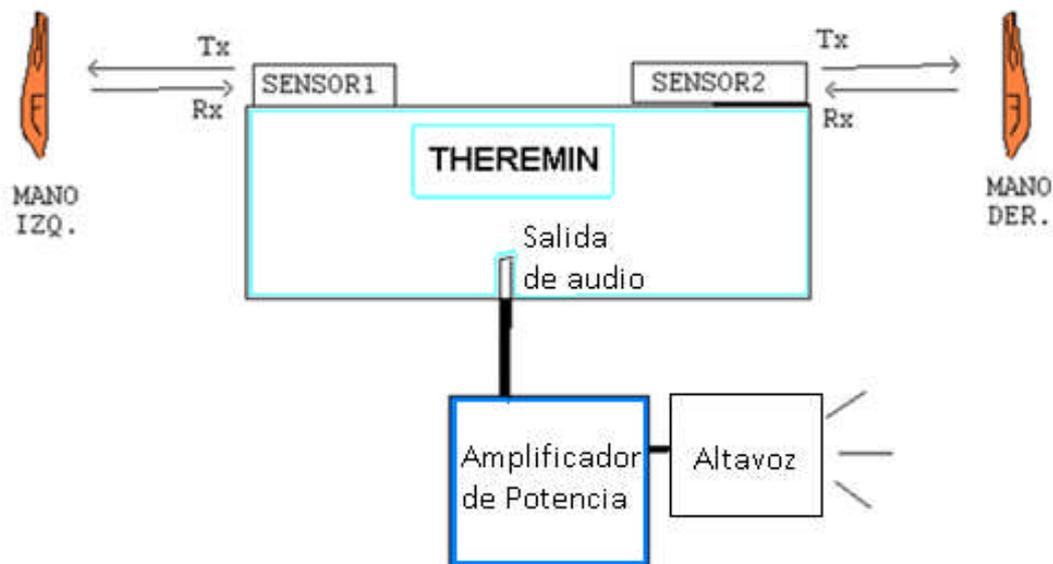


Fig. 1.3. Aspecto propuesto para nuestro theremin digital.

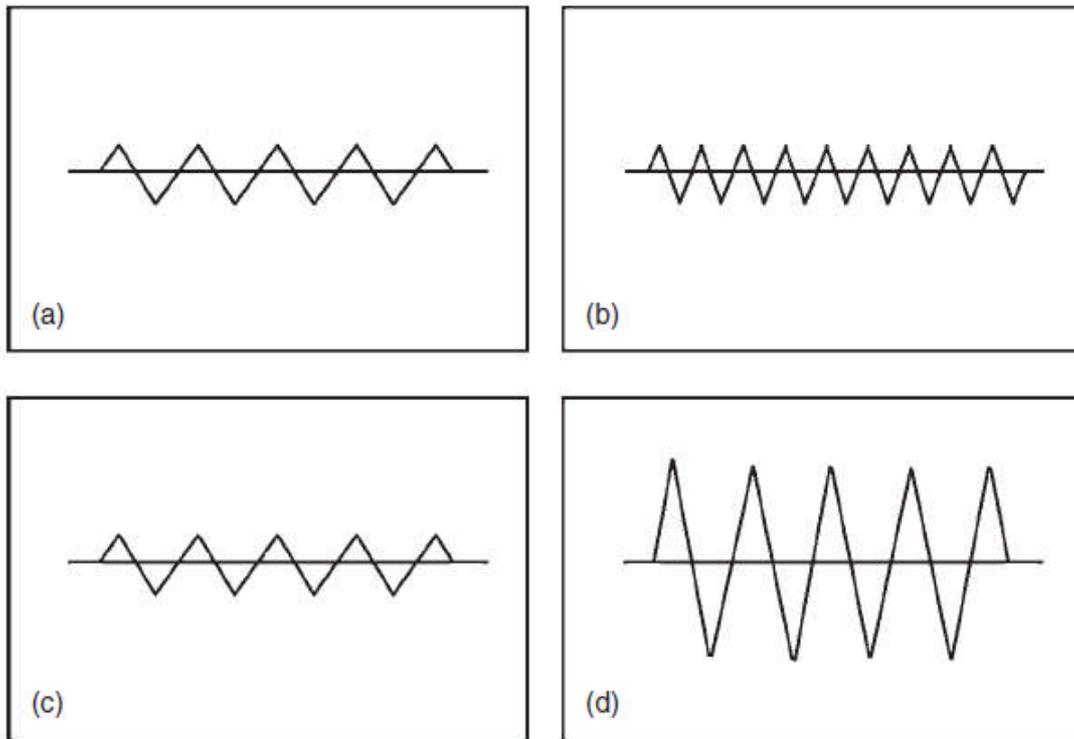


Fig. 1.4. Señal de audio controlada en frecuencia (a y b) y en amplitud (c y d).

II. HERRAMIENTAS ELECTRÓNICAS

II.1. MÓDULO SENSOR DE ULTRASONIDOS

II.1.1. INTRODUCCIÓN

El módulo de ultrasonidos TS601 (de la empresa Audiowell Electronics, <http://www.audiowell.com>) tiene un rango de alcance entre 0.03-3 metros efectivos. Transforma los datos a impulsos con diferente ancho, mediante el uso de software en un microcontrolador.

II.1.2. CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO

- Alta sensibilidad
- Zona angosta de eco
- Respuesta rápida

Principio de Medida	Detector Ultrasonido
Aplicación Típica	Medida de Distancia
Rango de Medida	0.03 ~ 3 m
Precisión de Medida	± 2 cm
Forma de Salida	Ancho de Impulso
Voltaje de Trabajo	5 VDC
Corriente de Consumo	≤ 15 mA
Frecuencia del Sensor	40 kHz
Tiempo de Respuesta Continua	15 ms
Temperatura de Trabajo	0 °C ~ 70 °C
Humedad Relativa	≤ 85 %
Presión Atmosférica	86 ~ 106 kPa

Tabla 1: Especificaciones del sensor de ultrasonidos

II.1.3. CONEXIÓN ELÉCTRICA

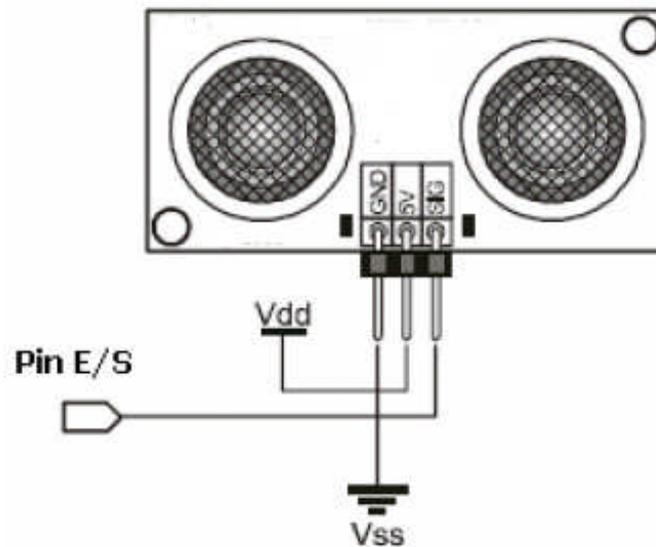
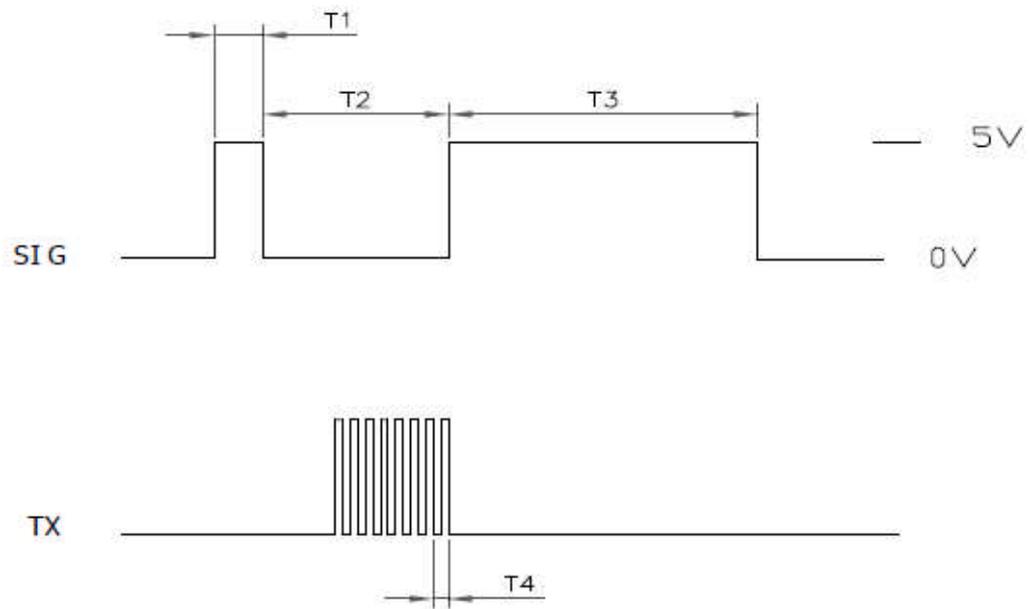


Fig. 2.1. Terminales de conexión del sensor.

II.1.4. PRINCIPIO DE OPERACIÓN

- El módulo recibe un pulso en la entrada SIG (T1).
- Cuando la señal cae (T2), el módulo transmite una señal ultrasónica de 40kHz.
- Mientras el módulo recibe el eco de la señal, el nivel eléctrico del pin SIG se levanta a 1.
- La duración del nivel alto (T3) dependerá de la distancia entre el objeto y el módulo.
- Después de 18.5ms, el nivel alto desciende ya que no encuentra un objeto dentro de los 3 metros.
- Luego el usuario puede computar la distancia mediante el ancho del pulso que retorna el módulo.



- T_1 (Disparo): $5\mu\text{s}$
 T_2 (Espera): $200\mu\text{s}$
 T_3 (Ancho pulso): $0-18.5\text{ms}$
 T_4 (Ciclo): $25\mu\text{s}$

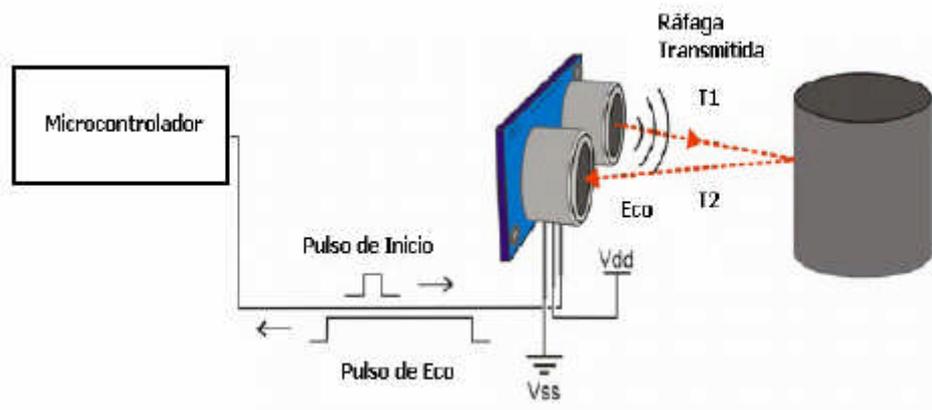


Fig. 2.2. Señales de transmisión y recepción del sensor de ultrasonidos.

II.2. MICROCONTROLADOR PIC16F84A

El PIC16F84A [7] [8] es un microcontrolador de 8 bits perteneciente a la familia PIC16 de la empresa Microchip (<http://www.microchip.com>). Presenta las siguientes características:

- Memoria Flash de programa (1K x 14 bits).
- Memoria EEPROM de datos (64 x 8 bits).
- Memoria RAM (68 registros x 8 bits).
- Un temporizador/contador (timer de 8 bits).
- Un divisor de frecuencia.
- Varios puertos de entrada-salida (5 pines el puerto A y 8 pines el puerto B).

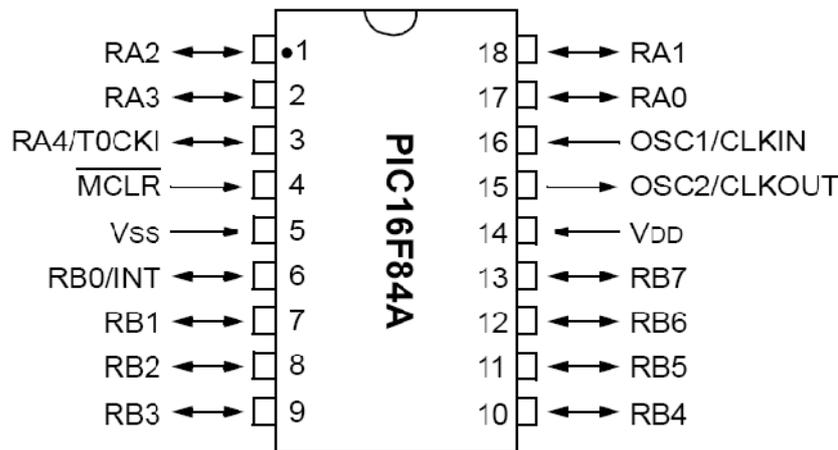


Fig. 2.3. Diagrama de pines del microcontrolador PIC16F84A.

- Manejo de interrupciones (de 4 fuentes).
- Perro guardián (watchdog).
- Frecuencia de reloj externa máxima 10MHz. (Hasta 20MHz en nuevas versiones). La frecuencia de reloj interna es un cuarto de la externa, lo que significa que con un reloj de 20MHz, el reloj interno sería de 5MHz y así pues se ejecutan 5 Millones de Instrucciones por Segundo (5 MIPS).
- Pipe-line de 2 etapas, 1 para búsqueda de instrucción y otra para la ejecución de la instrucción (los saltos ocupan un ciclo más).
- Repertorio de instrucciones reducido (RISC), de 30 instrucciones distintas.

II.3. PROCESADOR DE AUDIO SIGMADSP

Los procesadores de audio SigmaDSP representan una amplia familia de procesadores, usados en muchas aplicaciones diferentes de audio y especialmente en automoción. Por esta razón algunas de las características y algoritmos disponibles en el software no son requeridas estrictamente por fabricantes de altavoces u otros diseñadores de aplicaciones pro-audio. Son desarrollados por la empresa Analog Devices:

<http://www.analog.com/en/products/processors-dsp/sigmadsp-audio-processors.html>.

El procesador de audio SigmaDSP que utilizaremos será el ADAU1701.

El ADAU1701 es un completo sistema de audio integrado en un único chip con un DSP de audio de 28/56 bits, conversores digital-analógico, conversores analógico-digital, e interfaces de control como microcontroladores. El procesamiento de señal incluye ecualización, cruce por cero, realce de bajos, procesamiento de dinámica multibanda, compensación del retardo, compensación del altavoz, y ensanchamiento de imagen estéreo.

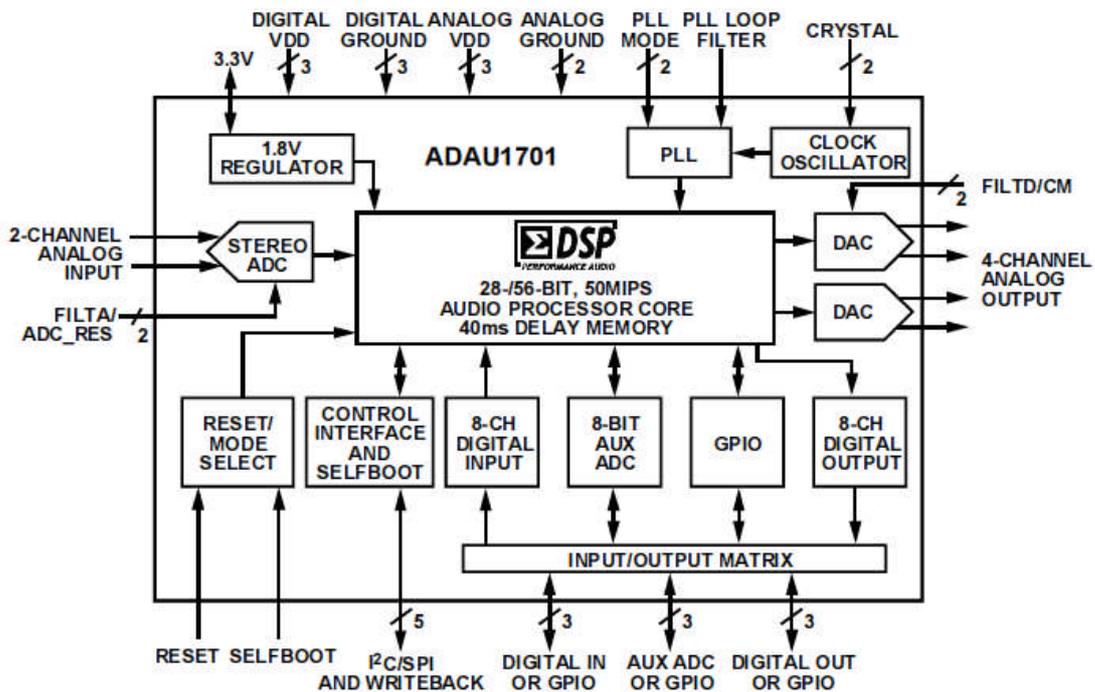


Fig. 2.4. Diagrama de bloques del ADAU1701.

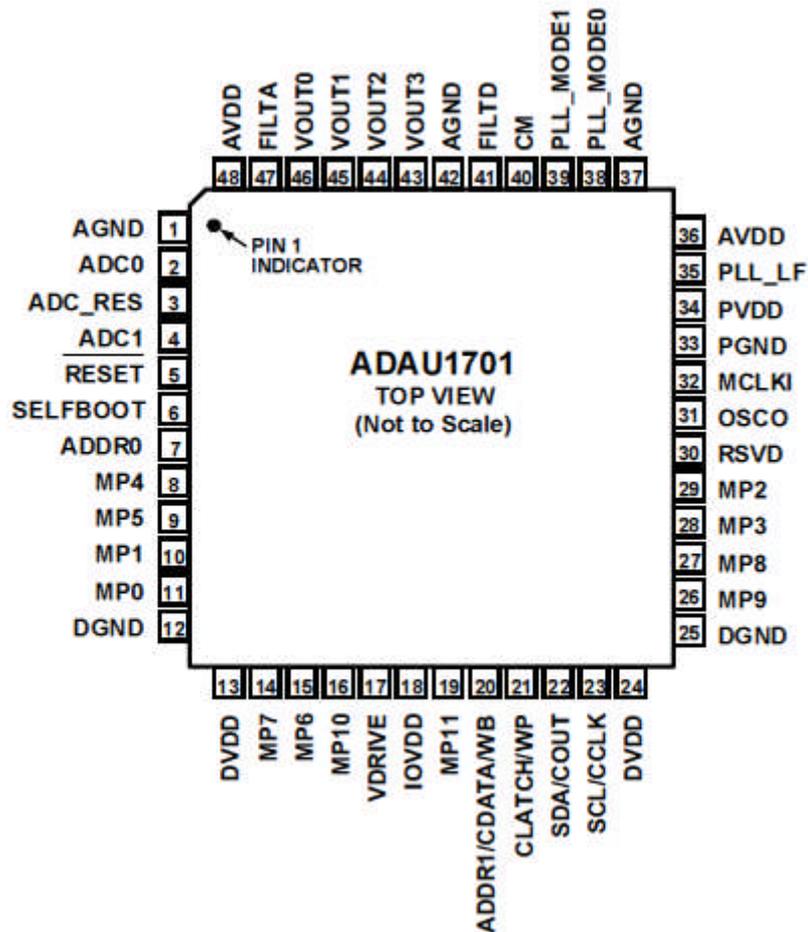


Fig. 2.5. Diagrama de pines del ADAU1701.

Este procesamiento puede ser utilizado para compensar limitaciones del mundo real de altavoces, amplificadores, y ambientes de escucha, proporcionando dramáticas mejoras en la calidad del audio percibido.

Su procesamiento de señal es comparable al que se encuentra en equipamiento de estudio de calidad superior. La mayoría del procesamiento es hecho en 56 bits, modo de doble precisión, resultando un muy buen desempeño de señal de bajo nivel. El ADAU1701 es un DSP completamente programable. La facilidad al usar el software SigmaStudio permite al usuario configurar gráficamente un flujo de procesamiento de señal utilizando bloques tales como filtros, procesadores de dinámica, controles de nivel y controles de interfaz GPIO.

II.4. SIGMASTUDIO

La herramienta gráfica de desarrollo SigmaStudio, diseñada por Analog Devices, es una herramienta desarrollada específicamente para programar los procesadores de audio SigmaDSP.

El software incluye una extensa librería de algoritmos para procesamiento de audio tales como filtrado, mezcla y procesamiento de dinámica, así como funciones DSP de bajo nivel y controles.

Todos estos algoritmos están disponibles como bloques de procesamiento que pueden conectarse como en un diagrama esquemático: esto significa que no estás forzado a utilizar un camino de procesamiento de señal predefinido sino que puedes decidir libremente cada uno de sus detalles, determinando la cantidad de filtros, ecualizadores, limitadores o retardos dependiendo de tus necesidades reales y la cantidad de recursos disponibles.

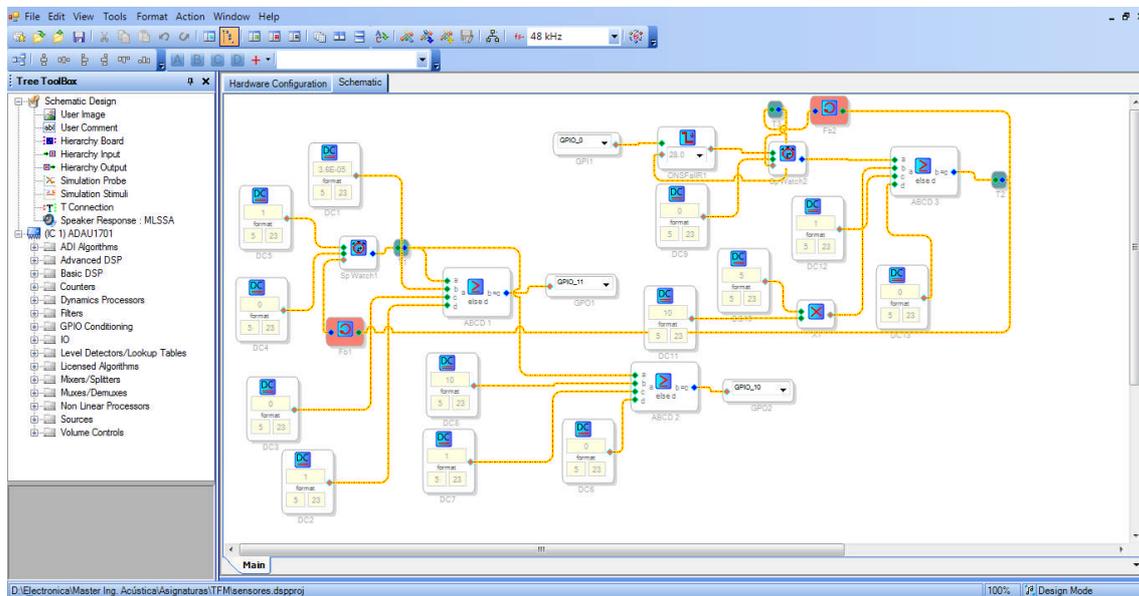


Fig. 2.6. Editor de esquemático para generación de código gráfico.

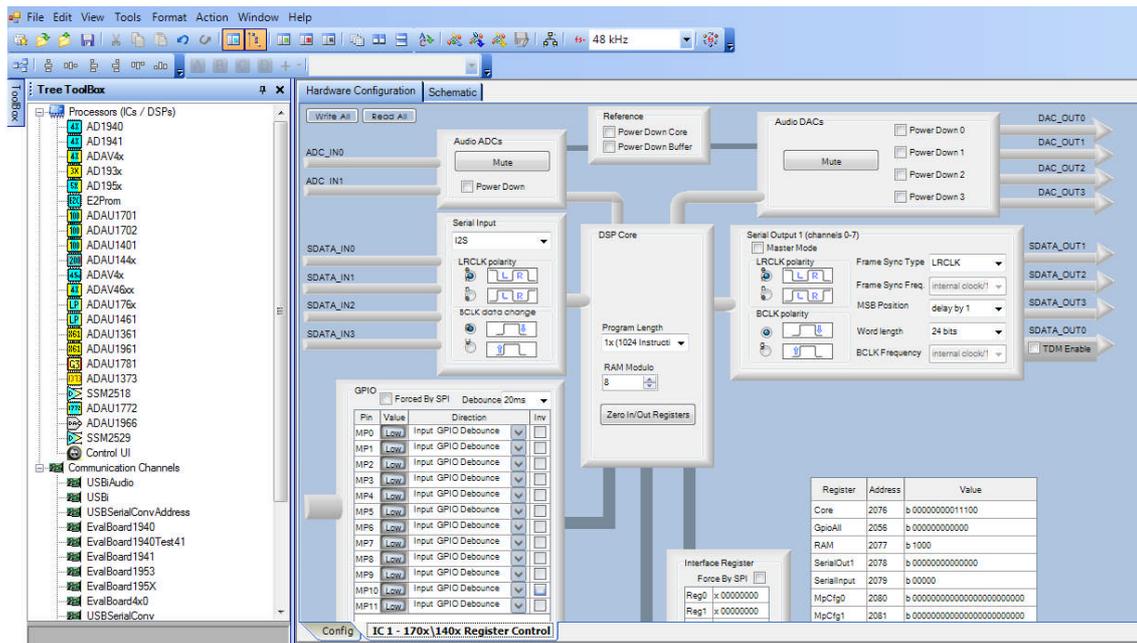


Fig. 2.7. Configuración del hardware del procesador de audio SigmaDSP.

El compilador se ocupa de generar el código DSP y una superficie de control para los parámetros de ajuste y sintonizado en tiempo real, escuchando el resultado de los cambios que hagas.

Esta herramienta permite a los ingenieros con poca experiencia escribiendo código DSP, implementar fácilmente un DSP en sus diseños y, además, todavía es lo suficientemente potente para satisfacer las demandas de los diseñadores experimentados de DSP.

II.5. BUFFER TRIESTADO 74LVC126AD

El circuito integrado 74LVC126AD es un buffer con salidas tri-estado que posee entradas y salidas tolerantes a 5 voltios. Gracias a este chip es posible la comunicación entre los dispositivos de 5 voltios con los dispositivos de 3.3 voltios.

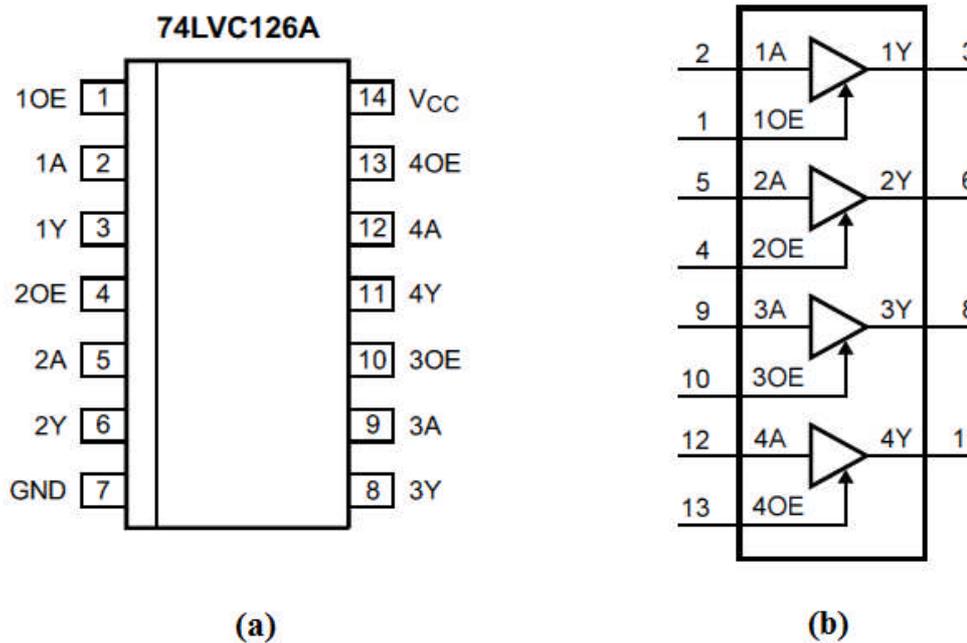


Fig. 2.8. Diagramas de (a) pines y (b) bloques, del buffer 74LVC126AD.

Como se observa en la Fig. 2.8 (b), el 74LVC126AD consiste de cuatro buffers no inversores con salidas tri-estado, las cuales son controladas por la entrada de habilitación de salida (*nOE*). Un nivel bajo en *nOE* origina que las salidas asuman un estado de alta impedancia. Es decir, las entradas *nOE* son activas en alto, *nA* corresponde a la entrada de datos, *nY* corresponde a la salida de datos.

Las entradas pueden manejarse desde dispositivos de 3.3 voltios o 5 voltios. Cuando se encuentra deshabilitado hasta 5.5 voltios puede aplicarse a las salidas.

II.6. SOFTWARE DE DISEÑO “EAGLE”

EAGLE (siglas de *Easily Applicable Graphical Layout Editor*) [9], es un potente y flexible software de diseño de placas de circuito impreso (PCB por sus siglas en inglés), que ofrece alto nivel de funcionalidad a bajo costo desde hace más de veinte años. Este programa de diseño electrónico de la empresa Cadsoft (<http://www.cadsoftusa.com>) es muy popular debido al hecho de ser multiplataforma y contar con algunas licencias gratuitas. El ser tan popular ha propiciado que tenga una amplia colección de librerías de componentes y soporte a disposición de la comunidad de usuarios. Corre en Linux, Mac y Windows y permite variadas funciones tales como simulación, importación de datos, exportación de datos y comandos autodefinidos.

EAGLE incluye los siguientes módulos:

Editor de Esquemático: Conociendo los componentes a utilizar y los detalles del sistema, se procede a la captura del esquemático del circuito. En este paso definimos cómo se conectarán los componentes, información que se utilizará para guiar el editor de diseño de placas a la hora de trazar las pistas.

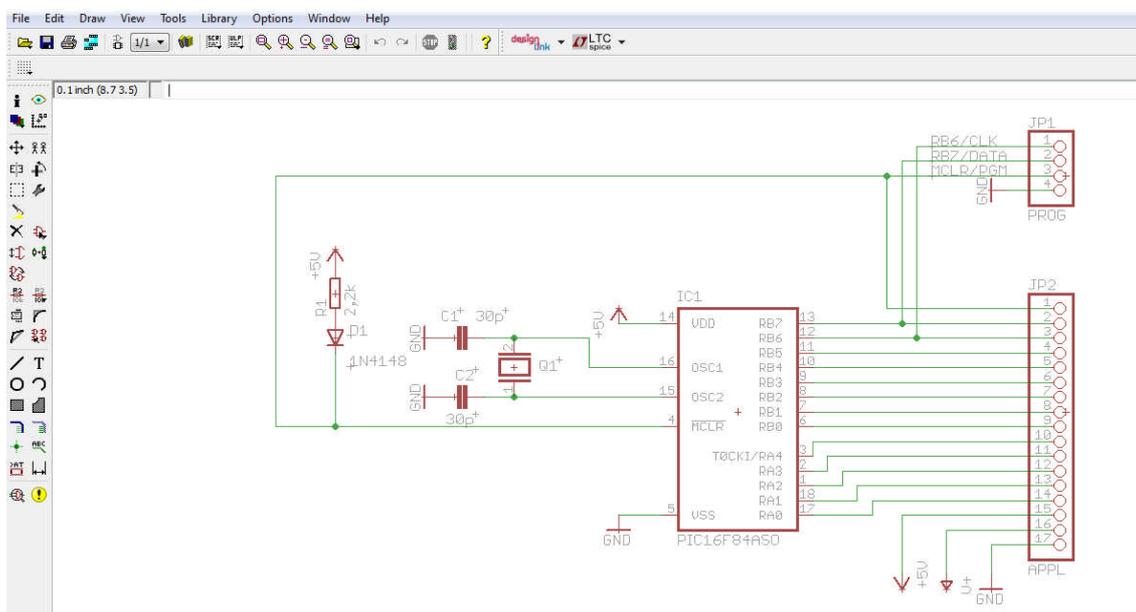


Fig. 2.9. Editor de esquemático del EAGLE.

Editor de Layout: Después de crear y verificar el esquemático, se puede pasar al editor de diseño de la PCB. Para pasar de un editor al otro se puede usar el botón “Generate/Switch to board”. Al hacerlo aparecerán las huellas de los componentes, que se podrán ir colocando en sus posiciones, y unas líneas amarillas entre ellas que representan las conexiones que se deben realizar y que todavía no están hechas.

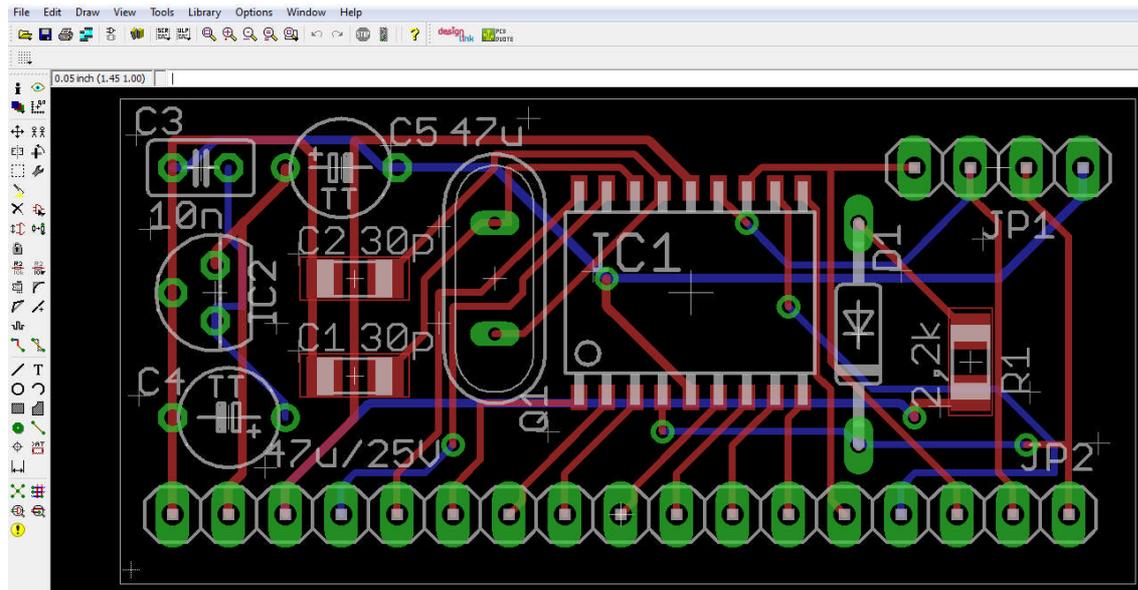


Fig. 2.10. Editor de layout del EAGLE.

Los editores del esquemático y del layout están conectados entre sí. Los cambios en uno de ellos se reflejarán en el otro. Suele ser habitual trabajar con los dos ficheros abiertos a la vez en pantallas distintas para no perder de vista la función de cada componente. También hay que mencionar que sería posible crear un proyecto directamente con el editor de layout, sin esquemático, aunque es algo que en general no se recomienda.

Además EAGLE proporciona una base de datos de componentes. Esta base de datos, por muy amplia que sea, siempre quedará desfasada con el tiempo, por lo que también incluye un editor de base de datos para crear y añadir nuevos componentes.

II.7. SOFTWARE DE DISEÑO “FREECAD”

FreeCAD (<http://www.freecadweb.org>) es una aplicación libre de diseño asistido por ordenador, en tres dimensiones, para la asistencia en ingeniería mecánica y el diseño de elementos mecánicos. Está basado en Open CASCADE y programado en los lenguajes C++ y Python.

A diferencia de los CAD analíticos tradicionales, FreeCAD es un CAD paramétrico que utiliza parámetros para definir sus límites o acciones. En el diseño paramétrico cada elemento del dibujo (muros, puertas, ventanas, etc.) es tratado como un objeto, el cual no es definido únicamente por sus coordenadas espaciales (x, y, z), sino también por sus parámetros, ya sean estos gráficos o funcionales. Las bases de datos relacionadas con el objeto hacen que este software, y especialmente su banco de trabajo de arquitectura, esté muy relacionado con el enfoque BIM, en el que un modelo BIM contiene el ciclo de vida completo de la construcción, desde el concepto hasta la edificación.

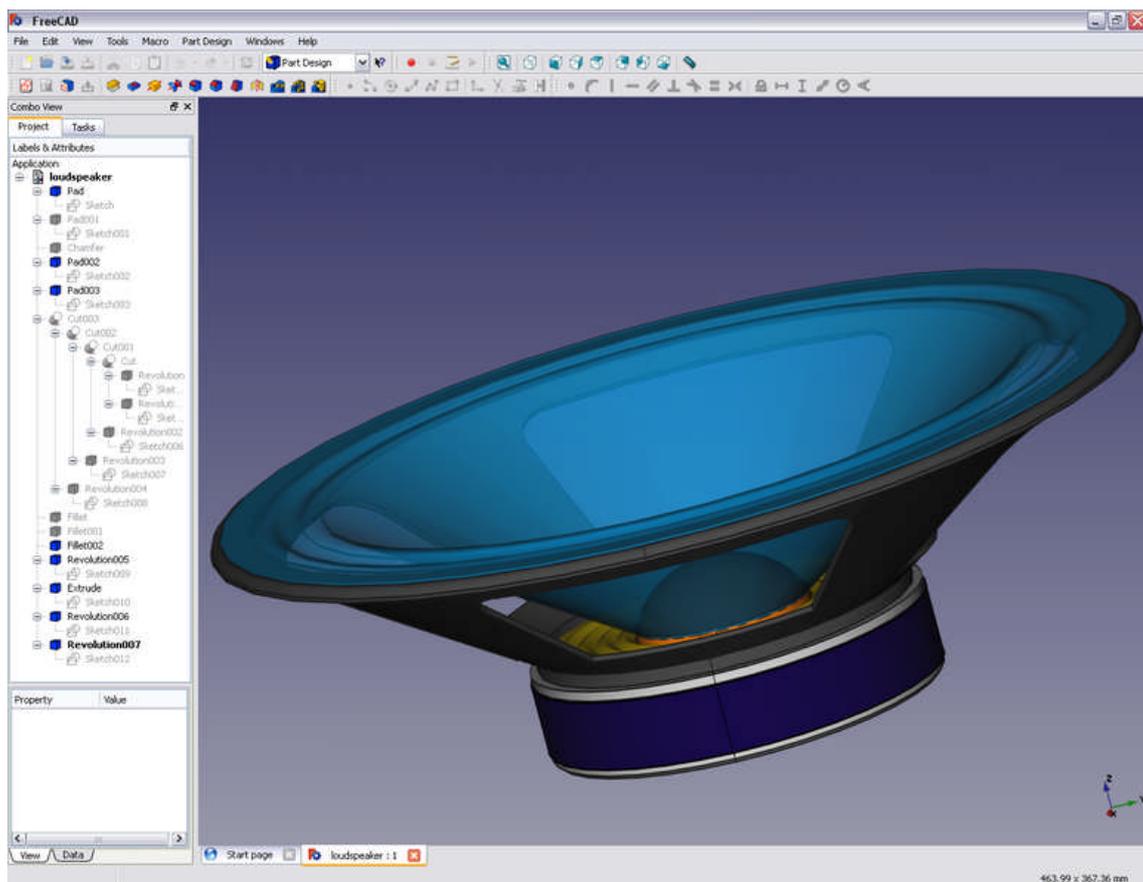


Fig. 2.11. Programa FreeCAD.

III. THEREMIN

III.1. INTRODUCCIÓN

Los que hayan visto un theremin 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). 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 el volumen.



Fig. 3.1. El mítico Theremin.

El Theremin es el primer instrumento musical electrónico del mundo, décadas antes de que a Robert Moog se le ocurriera fabricar un sintetizador resistivo. 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 altera radicalmente el sonido del instrumento.



Fig. 3.2. Lev Sergeievitch Termen ("León Theremin").

III.2. FUNCIONAMIENTO

En la Fig. 3.3 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 un circuito cerrado y completo. Su inventor, Lev Termen, lo describe de la siguiente manera: *"Se obtienen fácilmente sonidos de tono variable utilizando una corriente alterna de frecuencia también variable. Se coloca una pequeña varilla vertical a modo de antena, lo que genera ondas electromagnéticas de muy débil intensidad alrededor de la misma. Estas ondas tienen una longitud y una frecuencia definidas. La aproximación de una mano, que es un conductor eléctrico, altera la configuración del campo electromagnético que rodea a la antena, cambia su capacitancia y, como consecuencia, afecta la frecuencia de la corriente alterna generada en el instrumento. De este modo se produce una suerte de "toque invisible" en el espacio que circunda a la antena y, de la misma manera que en un violonchelo la presión de un dedo sobre la cuerda produce un sonido tanto más agudo cuanto más se acerca el dedo al puente, en el theremin el tono se incrementa cuanto más se acerca la mano a la antena. Del mismo modo, la intensidad del tono cambia al aproximar una mano a la otra antena, la de forma circular, alrededor de la cual se forman ondas electromagnéticas siguiendo el mismo principio. La aproximación de la mano produce un cambio en la intensidad de la corriente alterna que produce el tono. Así, levantando la mano por encima de la antena horizontal en forma de anillo la nota crece en volumen, mientras que bajando la mano ésta se hace más débil, hasta morir en medio del más suave pianísimo."*

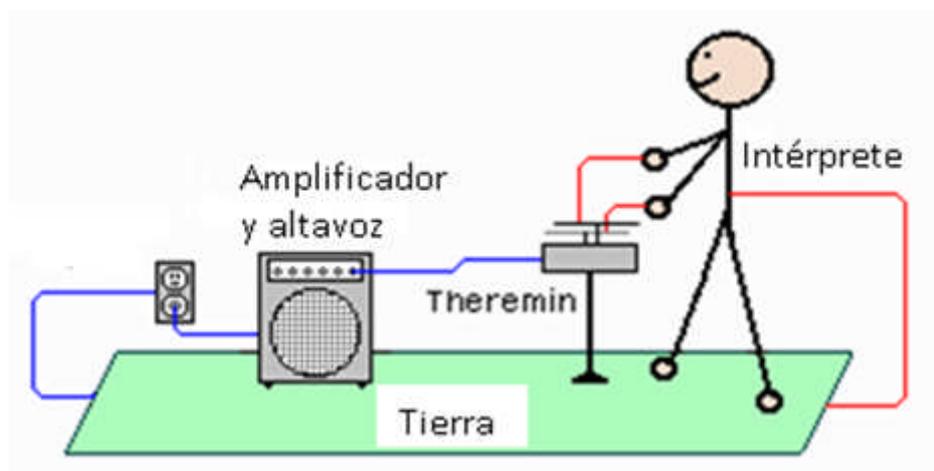


Fig. 3.3. Esquema que muestra el funcionamiento del theremin.

El sonido del theremin se produce según el principio del heterodino, con un oscilador de frecuencia variable superponiendo y afectando la oscilación de un oscilador de frecuencia fija (en realidad, la de aquél se resta de la de éste). La frecuencia resultante cae dentro del rango audible para el oído humano y esto es lo que escuchamos a través del altavoz. La frecuencia del oscilador fijo es de 170 kHz y la del variable oscila entre 168 y 170 kHz. Ello deja frecuencias audibles desde 0 hasta 2 kHz para ejecutar el instrumento.

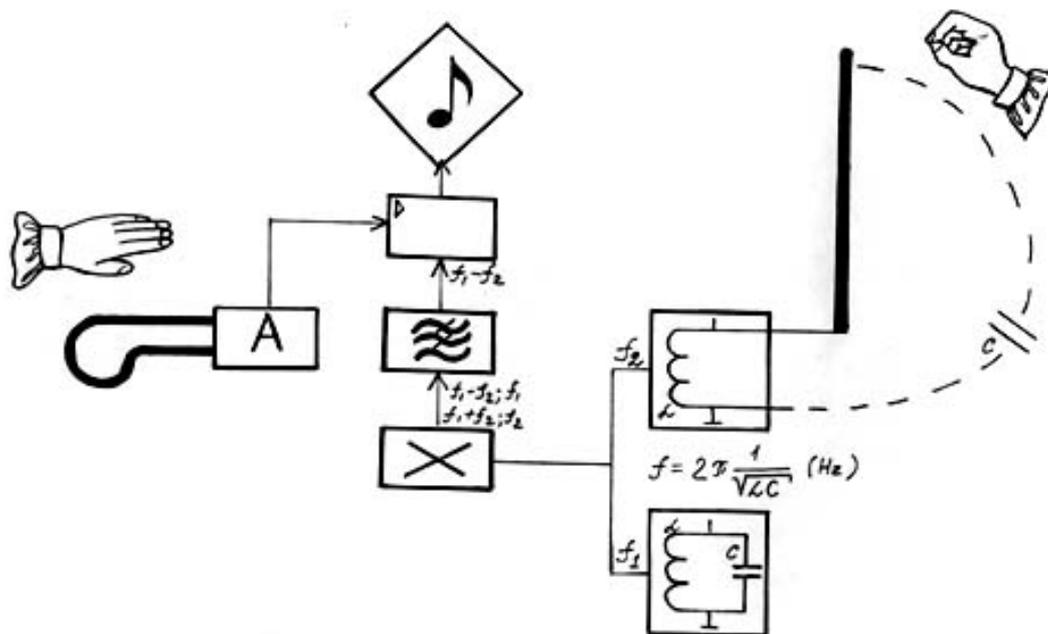


Fig. 3.4. Diagrama de bloques del theremin diseñado por Lev Termen.

III.3. THEREMIN: RESEÑA HISTÓRICA

Con la extendida disponibilidad de los tubos de vacío y la electrónica de radio durante la década de los veinte, muchos individuos laboriosos se pusieron a trabajar en crear los primeros instrumentos musicales electrónicos. Los tubos de vacío permitieron a los inventores producir dispositivos compactos que no atenuaban las luces de los faroles cuando eran usados y, talvez lo más importante, cada miembro de esta nueva generación de instrumentos poseía una voz electrónica única que no estaba diseñada para imitar la de los instrumentos musicales tradicionales.

Uno de los primeros instrumentos en fascinar a las audiencias y a los compositores fue invención del ingeniero eléctrico y violonchelista ruso Lev Sergeievitch Termen [10], quien era más conocido por la versión francesa de su nombre: **León Theremin** (1896-1993). Originalmente

llamado Etherophone o Thereminvox pero más tarde simplemente Theremin, este dispositivo fue construido en Rusia alrededor de 1920. Aunque Termen solicitó patentes en Alemania y América durante 1924 y 1925, no fue hasta 1927 que los americanos presenciaron por primera vez presentaciones en vivo del instrumento.

El Theremin se distinguió por el sonido monofónico (que no puede tocar varias notas simultáneamente, sólo una), y una técnica de interpretación que se prestaba a un solo instrumental. Quizá la característica más extraña de este instrumento era que lo tocabas simplemente con mover las manos en la cercanía de dos antenas. Esta desconcertante exhibición no sólo impresionaba a la mayoría de observadores, sino también agregaba un alto grado de teatralidad a la interpretación. Por consiguiente, éste fue el *primer instrumento musical electrónico de control espacial*.

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.



Fig. 3.5. León Theremin mostrando la circuitería interior de su instrumento.

El sonido del Theremin era muy cercano al de una onda senoidal pura pero con suficientes bandas laterales para agregar profundidad y cuerpo al tono. El Theremin original se dice que tenía un rango de cinco octavas. El sonido era continuo a menos que la mano se moviese dentro y fuera de la vecindad de la antena. Efectos especiales tales como vibrato eran fáciles de producir con simples movimientos de la mano [11].

Siendo monofónico, el instrumento era melódico por naturaleza y disfrutó de mucha notoriedad durante las décadas de los veinte y treinta. Lev Termen firmó un acuerdo de licencia con RCA (fabricantes de radio americanos) para fabricar y vender una versión comercial de su instrumento para el público. El **RCA Theremin** fue presentado en 1929. Tenía un rango de aproximadamente tres octavas y media, la nota más alta era de aproximadamente 1400 Hz. El manual de servicio de RCA describe al instrumento como: *“Un instrumento musical operado enteramente en principios eléctricos y tocado por los movimientos de la mano en el espacio. Sin tener las limitaciones de teclados, registros, etcétera, puede obtenerse una excepcional individualidad de expresión.”*

Aunque fácil de describir, el Theremin presentaba bastante dificultad para controlarse. Sólo quinientos fueron vendidos por la RCA. El instrumento permaneció en recitales musicales durante la década de los treinta, no obstante los compositores no tenían idea de cómo componer para este instrumento. Sus repertorios estaban llenos de triviales partes de solo que habrían podido tocarse muy fácilmente en cualquier instrumento de cuerda. El mismo Termen demostraba el instrumento

tocando piezas familiares para violonchelo. La thereminista más devota de entonces, **Clara Rockmore** (1911-1998), conoció al inventor e hizo recitales de música clásica interpretando música convencional en este instrumento poco convencional. Sus interpretaciones frecuentemente incluyeron adaptaciones de trabajos para cuerda de Rachmaninoff, Saint-Saëns, Stravinsky, Ravel y Tchaikovsky. Literalmente, uno tenía que arrancar una serie de notas de la nada con gran precisión. Había poco espacio para el error. Rockmore es recordada hoy como la más grande maestra del instrumento y, afortunadamente, sobreviven algunas grabaciones en audio y vídeo de sus impresionantes interpretaciones.



Fig. 3.6. Clara Rockmore. La mejor thereminista de todos los tiempos.

III.4. EL THEREMIN TRANSISTORIZADO DE R.A. MOOG

En 1962 en Ithaca, Nueva York, un estudiante graduado en Física llamado **Robert Arthur Moog** (1934-2005) [12] estaba tranquilamente iniciando una revolución en el desarrollo de los instrumentos musicales electrónicos. Aficionado a la Electrónica desde su juventud, Moog había aprendido a construir el **theremin con transistores** mientras era estudiante en la Escuela Superior. Siendo luego un estudiante graduado en Cornell, decidió reavivar su afición. En una ocasión Moog diría: *“La cumbre de mi fabricación del theremin fue en la Escuela Superior. Vivía en un apartamento de tres habitaciones en el piso superior de una casa. Por diez dólares al mes, el propietario me permitía usar la sala para construir mis diseños del theremin...”*

Alrededor de mil unidades se vendieron durante la cumbre del pequeño negocio de Moog. La pasión de Moog por el Theremin y su misterioso inventor ruso, a quien nunca había conocido, lo pusieron directamente en camino a la invención de su innovador *Sintetizador Moog* [13] varios años después, no obstante, la debilidad por el Theremin nunca desapareció y por eso, al día de hoy, su compañía *Moog Music* continúa fabricando el *theremin de estado sólido*, un instrumento de alta calidad para músicos aventureros.



Fig. 3.7. Theremin transistorizado.

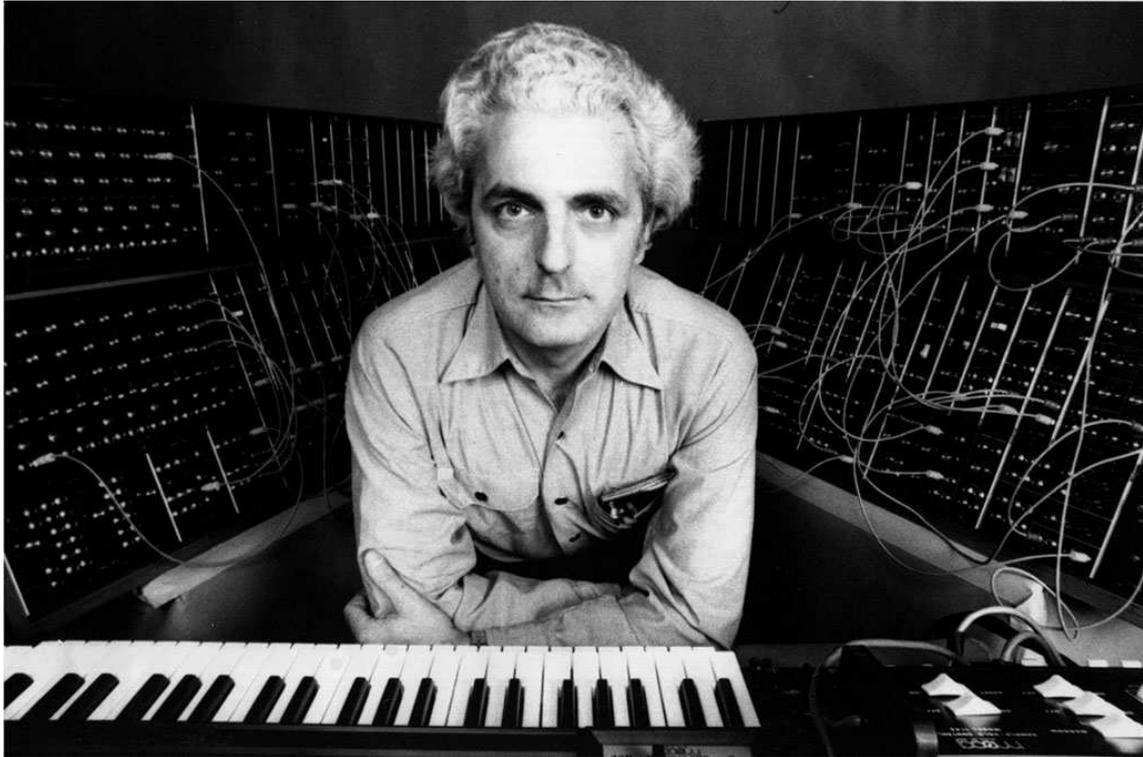


Fig. 3.8. Robert Arthur Moog.

Hay varios circuitos resonantes, o circuitos sintonizados, en el theremin. 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 y 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.

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. 3.9).

En el diseño de Moog 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. A continuación, revisaremos las funciones del circuito del *theremin transistorizado*. La Fig. 3.10 es un diagrama de bloques que muestra todas las funciones del circuito.

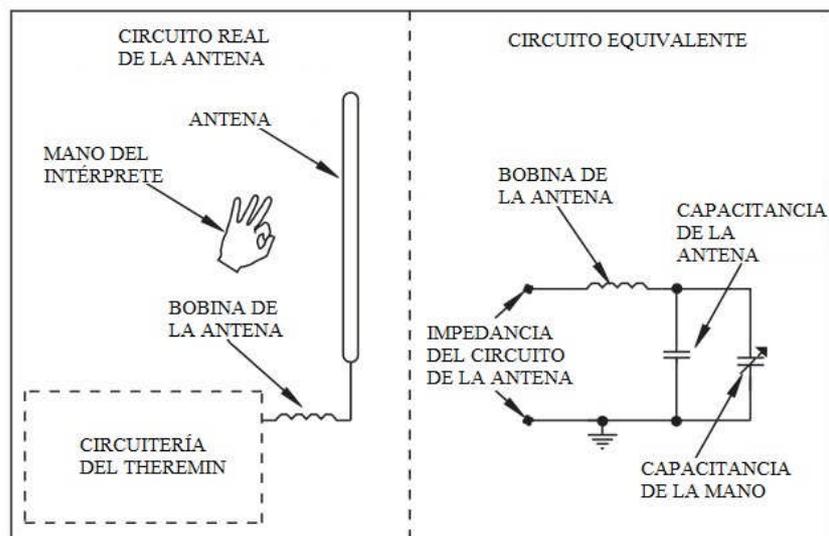


Fig. 3.9. Circuito equivalente de la capacitancia de la mano.

III.4.1. PRODUCCIÓN DEL SONIDO Y CONTROL DEL TONO

El sonido del *theremin* 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 decrementan 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.

III.4.2. 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 estos mismos voltajes disminuyen cuando la frecuencia de resonancia del circuito antena de volumen es decrementada por la adición de la capacitancia de la mano a la capacitancia de la antena de volumen. El circuito antena de volumen también incluye un subcircuito detector, que convierte en voltaje directo 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 *theremin transistorizado de Moog* 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. Tales capacitores variables por lo general ya no se encuentran disponibles a precios asequibles en la actualidad.

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.

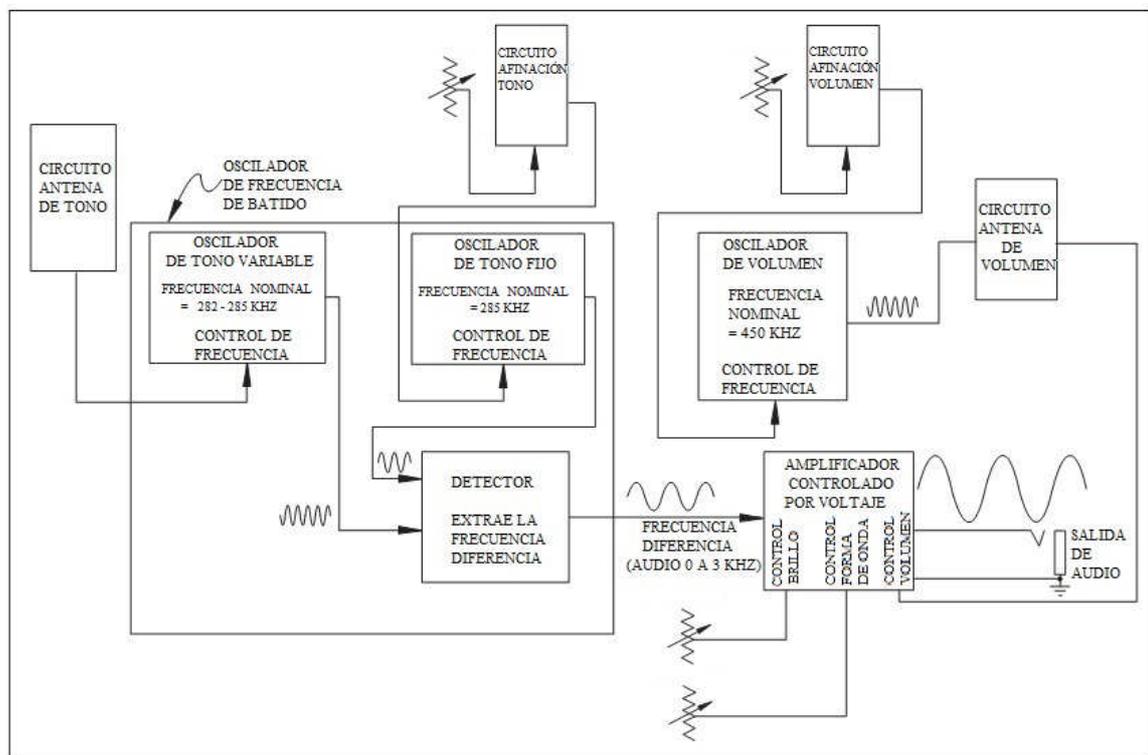


Fig. 3.10. Diagrama de bloques del theremin transistorizado.

IV. ETAPA DE DESARROLLO

IV.1. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL THEREMIN DIGITAL

La Fig. 4.1 muestra el diagrama de bloques general del theremin digital; éste consiste de dos placas sensor de ultrasonidos, la placa interfaz y la placa DSP. Los sensores de ultrasonidos se encargan de recibir el pulso de disparo proveniente de su respectivo microcontrolador y de enviar, hacia el mismo, el pulso de eco que representa la distancia de la mano al sensor. El pulso de eco es de 5 voltios por lo que debe adaptarse a 3.3 voltios antes de ingresar a la placa DSP, y de esto se encargará el buffer adaptador de nivel de la placa interfaz. Por consiguiente, a la placa DSP le ingresan 2 señales de eco de 3.3 voltios que se encargarán de controlar a la señal de salida de audio tanto en tono como en volumen.

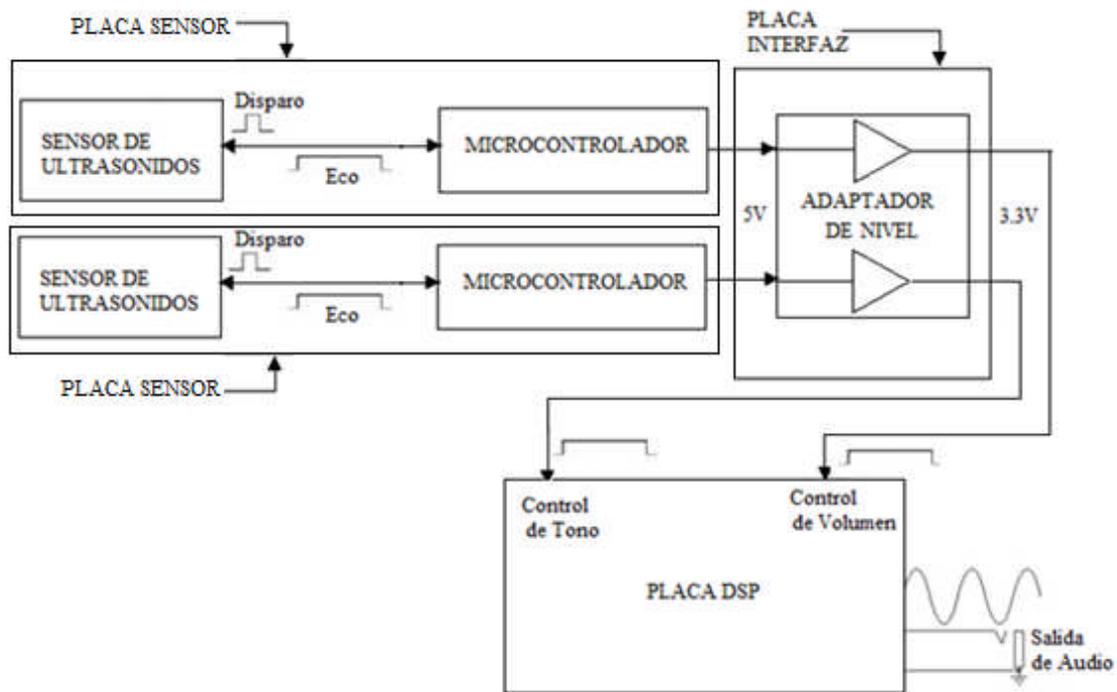


Fig. 4.1. Diagrama de bloques del theremin digital.

IV.2. PLACA SENSOR

En la Fig. 4.2 tenemos el diagrama esquemático de la placa sensor la cual permite la comunicación entre el sensor de ultrasonidos y el microcontrolador. En total serán dos placas sensor, una para el control del tono y la otra para el control del volumen. Cada placa contiene un microcontrolador de 8 bits que envía señales al sensor de ultrasonidos y recibe señales desde éste. Además, las placas presentan un conector de tres terminales que contiene las señales eco, tierra y alimentación (5 voltios) para su respectiva conexión con la placa interfaz.

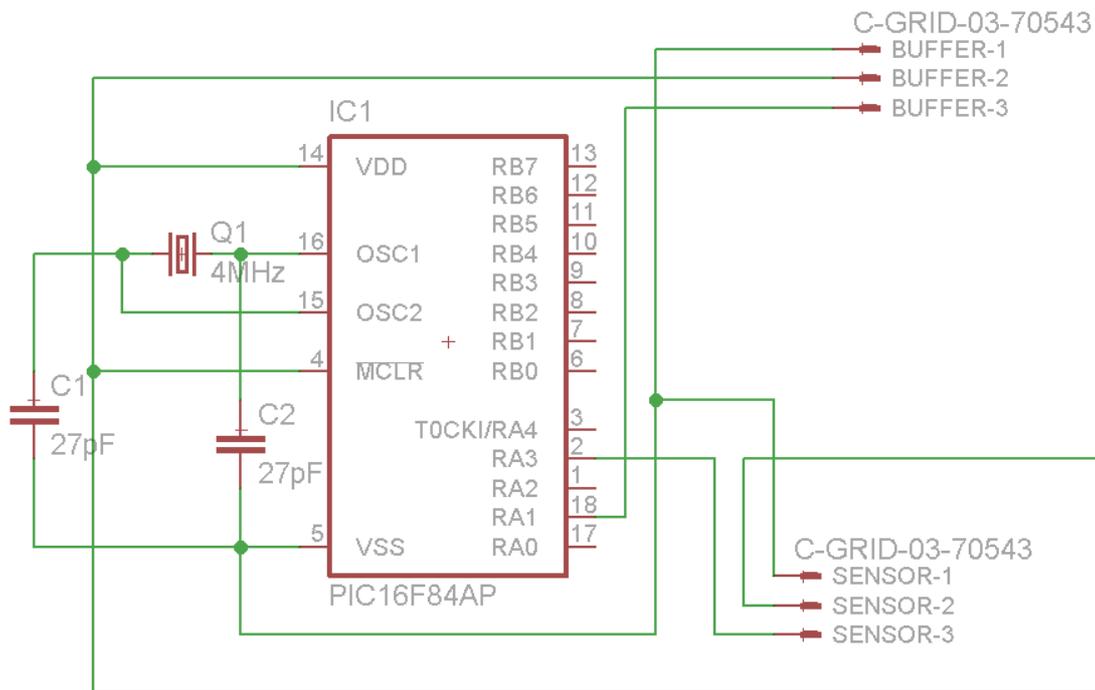


Fig. 4.2. Diagrama esquemático de la placa sensor.

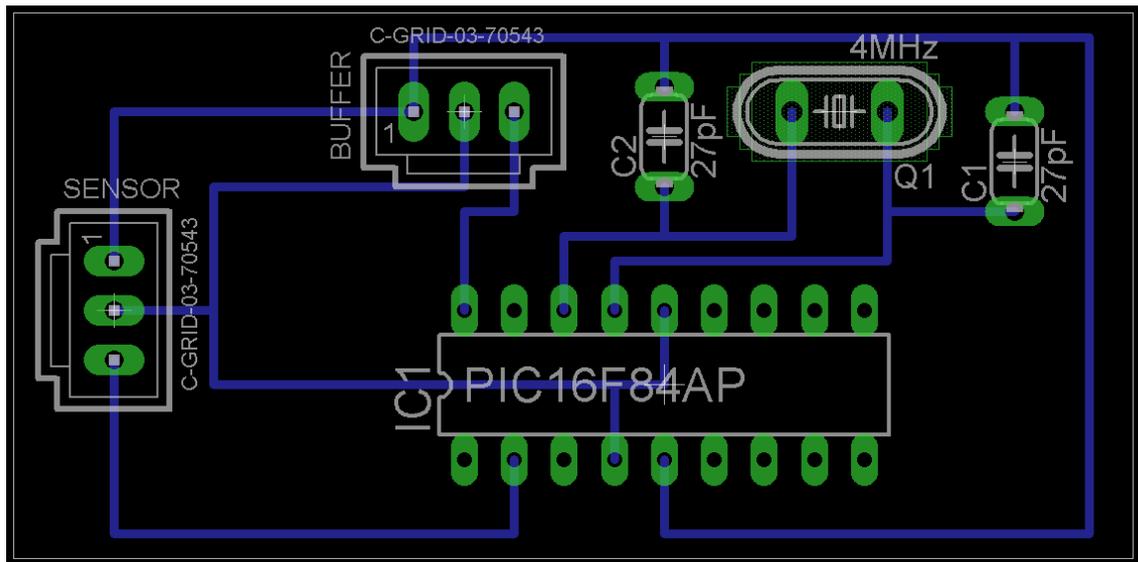


Fig. 4.3. Placa de circuito impreso de la placa sensor.

En la Fig. 4.3 tenemos su correspondiente placa de circuito impreso [14], diseñada enteramente con componentes *through hole*. La placa contiene el sensor de ultrasonidos, el microcontrolador PIC16F84A, un cristal de cuarzo de 4 MHz, dos condensadores de 27 picofaradios, y un conector molex de tres terminales (BUFFER) para conectar con la placa interfaz y que contiene entre sus señales a la señal de eco, generada por el sensor de ultrasonidos.

En la Fig. 4.4 tenemos una vista en 3D de la placa sensor.

Recordemos que para nuestro theremin digital necesitaremos dos módulos sensor de ultrasonidos, ya que uno servirá para controlar el tono de la señal de audiofrecuencia y el otro para controlar el volumen. Por consiguiente deben implementarse dos placas sensor idénticas, como las que implementamos de manera artesanal para nuestro prototipo del theremin digital y que se observan en la Fig. 4.5.

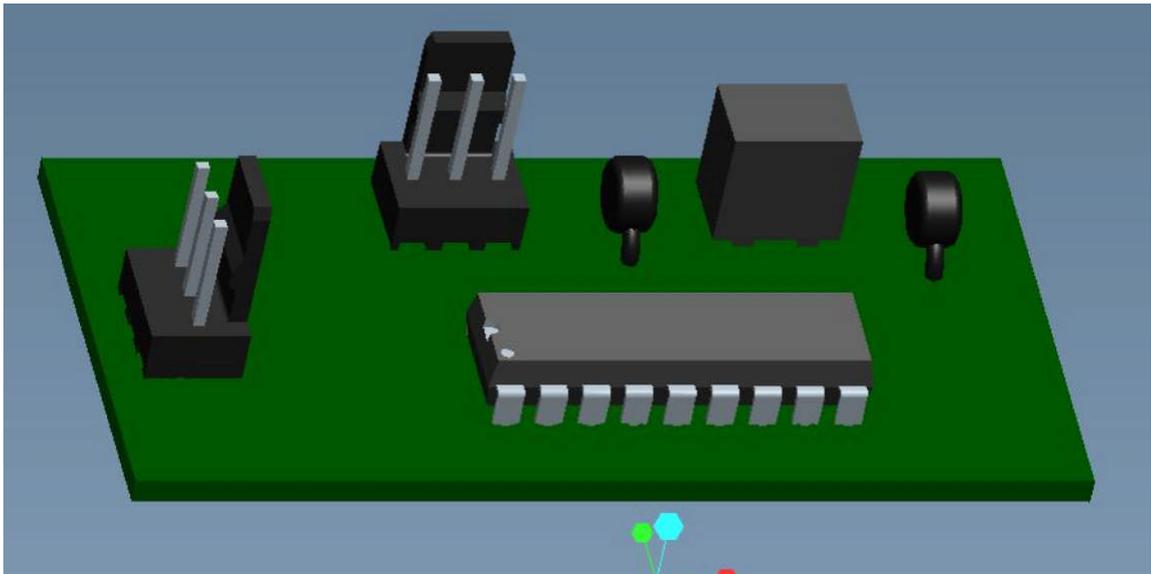


Fig. 4.4. Vista 3D de la placa de circuito impreso de la placa sensor.

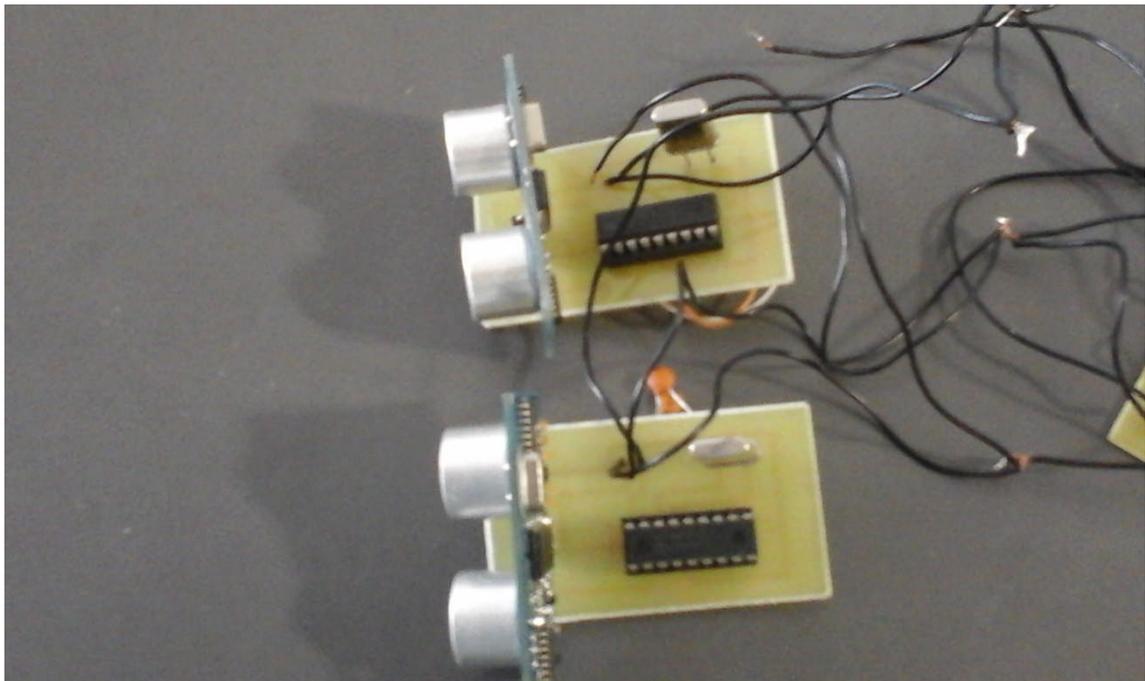


Fig. 4.5. Nuestras dos placas sensor implementadas en forma artesanal.

IV.3. SENSOR Y MICROCONTROLADOR

El sensor de ultrasonidos es controlado por el microcontrolador PIC16F84A mediante un programa codificado en lenguaje ensamblador. El microcontrolador se encarga de disparar el bloque transmisor del sensor y de recibir la señal PWM proveniente del bloque receptor del sensor. Además el programa saca, por uno de los puertos de salida del microcontrolador PIC, una señal idéntica a la señal PWM que recibe del sensor y que será la señal que se aplicará a la siguiente etapa (que funciona como un adaptador de nivel), tal como se observa en el diagrama de bloques de la Fig. 4.1.

El pulso de disparo hace que el bloque transmisor del sensor emita una ráfaga ultrasónica que rebota en la mano del intérprete o ejecutante del theremin. El rebote ingresa al bloque receptor del sensor y éste devuelve un pulso con ancho directamente proporcional a la distancia de la mano al sensor.

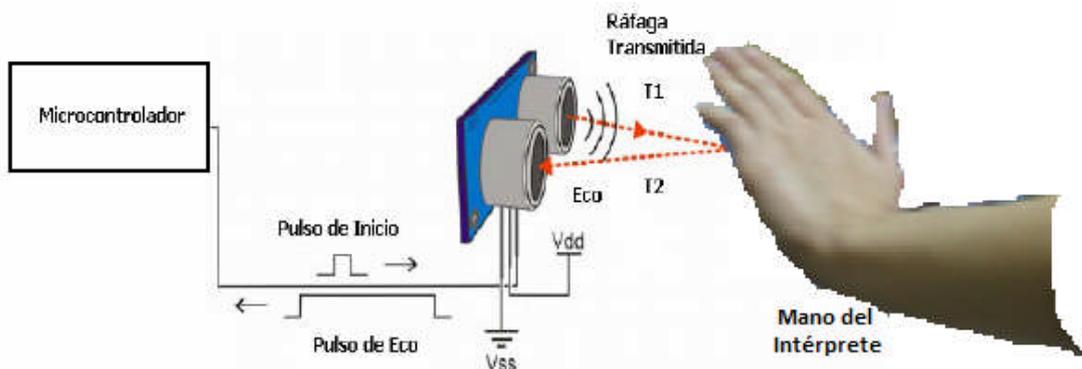


Fig. 4.6. Modo en que el microcontrolador interactúa con el sensor de ultrasonidos.

En la Fig. 4.7 tenemos el diagrama de flujo del programa, codificado en lenguaje ensamblador, para controlar los sensores de ultrasonidos. Y a continuación el código completo en lenguaje ensamblador.

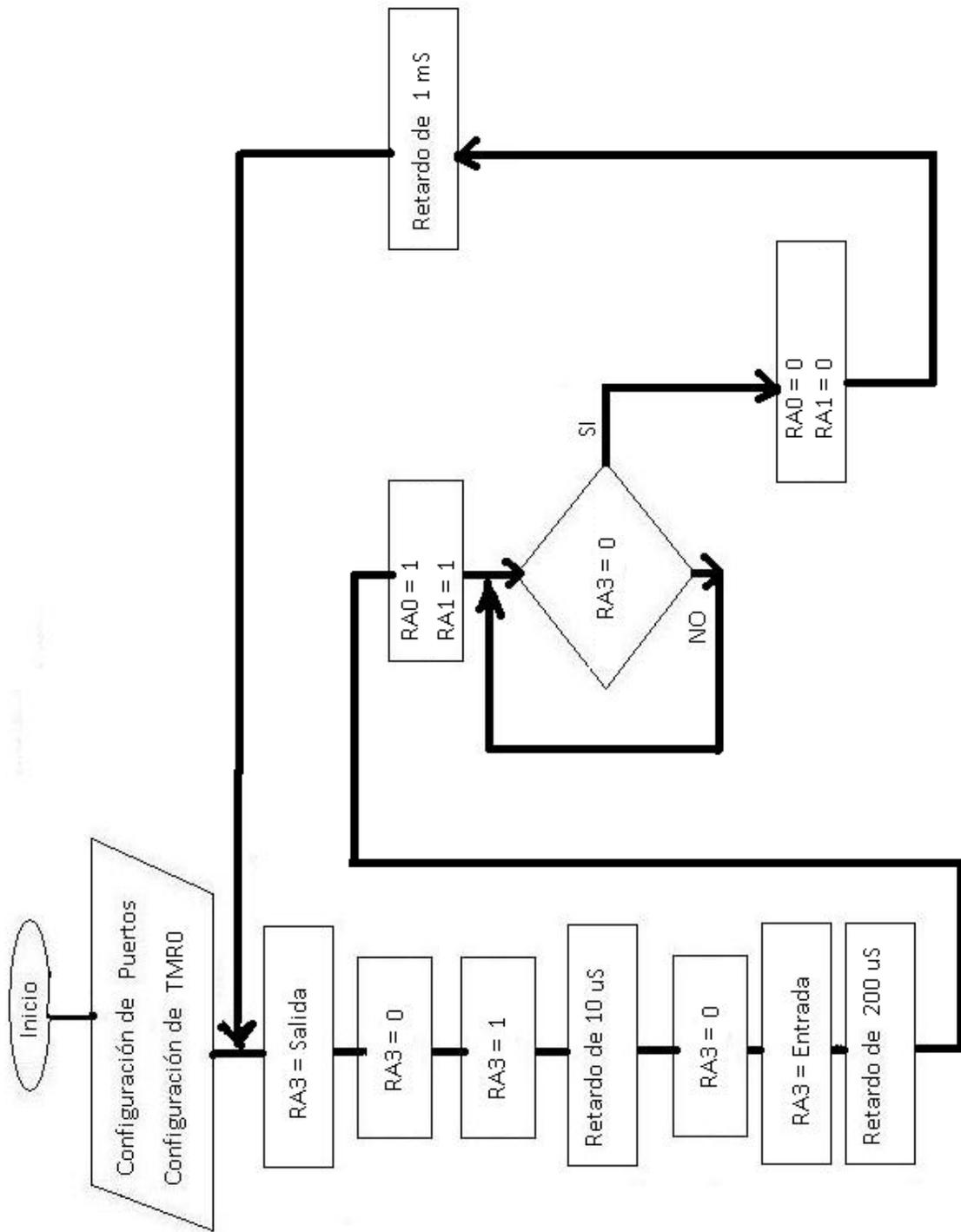


Fig. 4.7. Diagrama de flujo del programa para controlar los sensores.

Código ensamblador para control de sensores

```

LIST          p=16F84A

              RADIX      HEX
              #INCLUDE   <P16F84A.INC>
              ERRORLEVEL -302
              CBLOCK 0x0C
                  Distancia
                  Contador
                  Contador1
                  Contador2
                  aux
                  R_contB
                  R_contA
              ENDC

;PROGRAMA PRINCIPAL

              ORG      0
              goto    Inicio
              ORG      5

Inicio

              bsf     STATUS,RP0           ;BANCO 1
              clrf   TRISB                ;PORTB SALIDA
              bcf    TRISA,0              ;RA0 SALIDA
              bcf    TRISA,1              ;RA1 SALIDA
              movlw  b'00000000'         ;PRESCALER 2 PARA TMR0
              movwf  OPTION_REG
              bcf    STATUS,RP0           ;BANCO 0
              clrf   PORTB                ;PORTB SALIDA
              bcf    PORTA,0
              bcf    PORTA,1

Principal

              clrf   Distancia           ;Inicializa el registro
              clrf   Contador
              clrf   Contador1
              clrf   Contador2
              clrf   aux

```

```

        bcf     PORTA,0
        bsf     STATUS,RP0           ;BANCO 1
        bcf     TRISA,3             ;RA3 SALIDA
        bcf     STATUS,RP0           ;BANCO 0
        bcf     PORTA,3             ;Inicializa disparo en bajo
        bsf     PORTA,3             ;comienza el disparo
        call    delay_10uS          ;duración del pulso
        bcf     PORTA,3             ;final del disparo

.....;ESPERO REBOTE;.....
        bsf     STATUS,RP0           ;BANCO 1
        bsf     TRISA,3             ;RA3 ENTRADA
        bcf     STATUS,RP0           ;BANCO 0
        call    delay_200uS         ;Espera Tx y Rx del eco
        bsf     PORTA,0             ;Pongo a 1
        bsf     PORTA,1             ;Pongo a 1

Eco_0
        btfsc   PORTA,3             ;Espera flanco de bajada de la señal de salida
        goto    Eco_0              ;del sensor
        bcf     PORTA,0             ;Pongo a 0
        bcf     PORTA,1             ;Pongo a 0
        call    delay_1mS           ;Espera un tiempo hasta la prox medida
        goto    Principal

.....;RETARDO 200 uS;.....
delay_200uS
        nop
        movlw  d'64'
        goto   retardomicros

.....;RETARDO 50 uS;.....
delay_50uS
        nop
        movlw  d'14'
        goto   retardomicros

delay_20uS
        movlw  d'5'
        goto   retardomicros

retardomicros

```

```
        movwf  Contador
microbucle
        decfsz Contador,F
        goto  microbucle
        return

;;;;;;;;;;;;;;;;;RETARDO 10 uS;;;;;;;;;;;;;;;;;
delay_10uS
        nop
        nop
        nop
        nop
        nop
delay_5uS
        nop
delay_4uS
        return
delay_1mS
        movlw  d'1'
        movwf  Contador2
milibucle1C
        movlw  d'249'
        movwf  Contador1
milibucle2C
        nop
        decfsz Contador1,F
        goto  milibucle2C
        decfsz Contador2,F
        goto  milibucle1C
        return
END
```

IV.4. PLACA INTERFAZ (Y FUENTE DE ALIMENTACIÓN)

En la Fig. 4.8 tenemos el diagrama esquemático de la placa interfaz que permite la comunicación de los sensores de ultrasonidos con la placa DSP. El componente principal de esta placa es el circuito integrado 74LVC126AD, el cual es un buffer adaptador de nivel de 5 voltios a 3.3 voltios.

La placa presenta tres conectores de tres terminales: dos conectores para la conexión con las placas sensor de ultrasonidos y el restante para la conexión con la placa DSP.

Además, esta placa contiene la fuente de alimentación del theremin digital, por lo cual presenta dos reguladores de tensión: uno de 5 voltios y otro de 3.3 voltios.

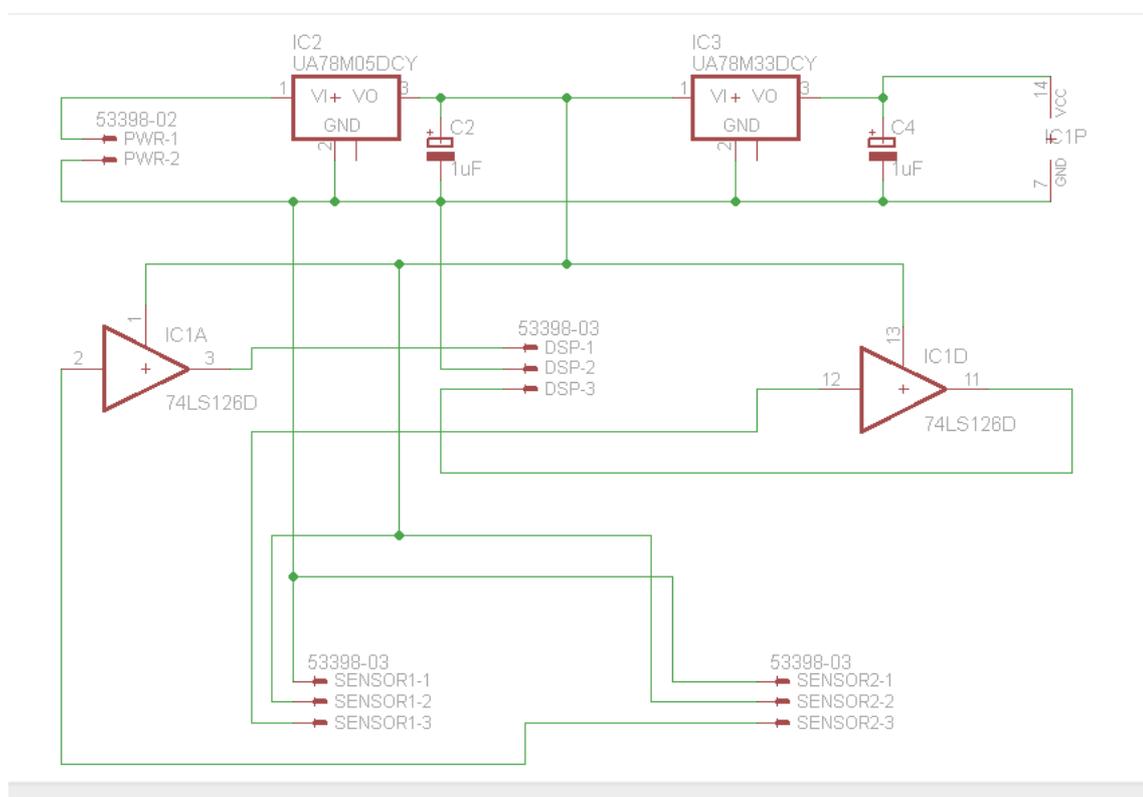


Fig. 4.8. Diagrama esquemático de la placa interfaz.

En la Fig. 4.9 tenemos la placa de circuito impreso de la interfaz, diseñada enteramente con componentes de montaje superficial [15]. Y en la Fig. 4.10 tenemos una vista en 3D de esta placa de circuito impreso.

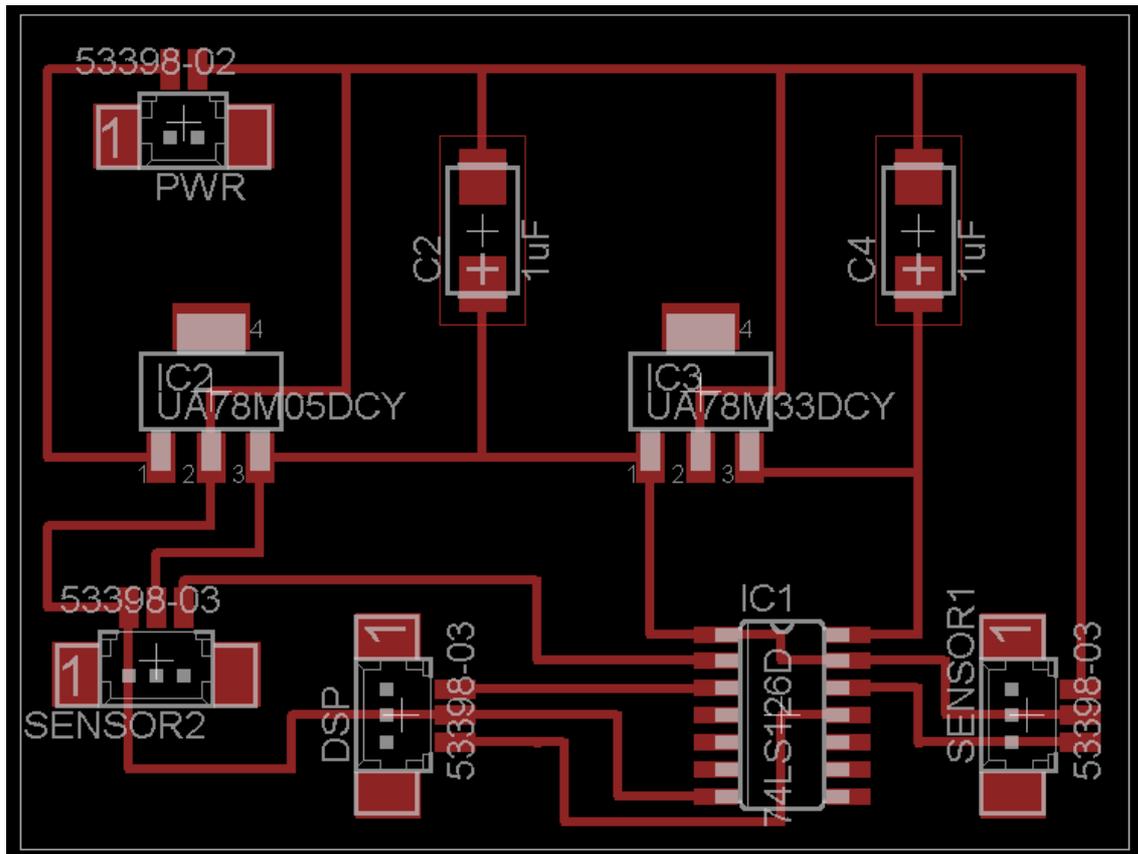


Fig. 4.9. Placa de circuito impreso de la interfaz.

En la Fig. 4.11 podemos observar la placa de circuito impreso de la interfaz implementada en forma artesanal para nuestro prototipo del theremin digital. Aquí observamos al circuito integrado buffer adaptador de 5 voltios a 3.3 voltios 74LVC126AD, tres conectores molex de tres terminales para la conexión tanto con la placa DSP como con las dos placas sensor, un regulador de tensión de 5 voltios, un regulador de tensión de 3.3 voltios, y un conector molex de dos terminales para conectar con una fuente de alimentación de 9 voltios.

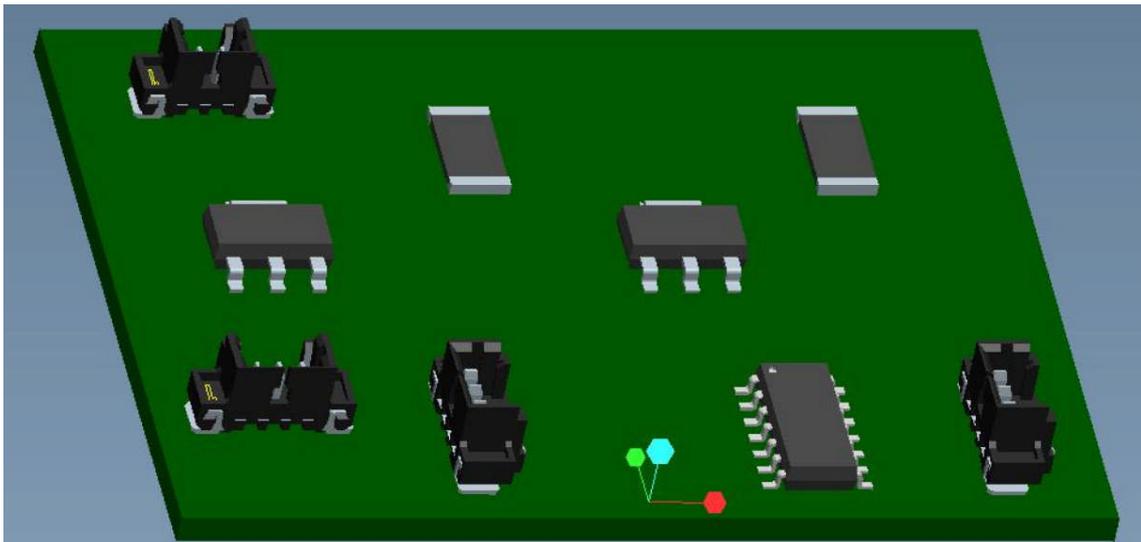


Fig. 4.10. Vista 3D de la placa de circuito impreso de la interfaz.

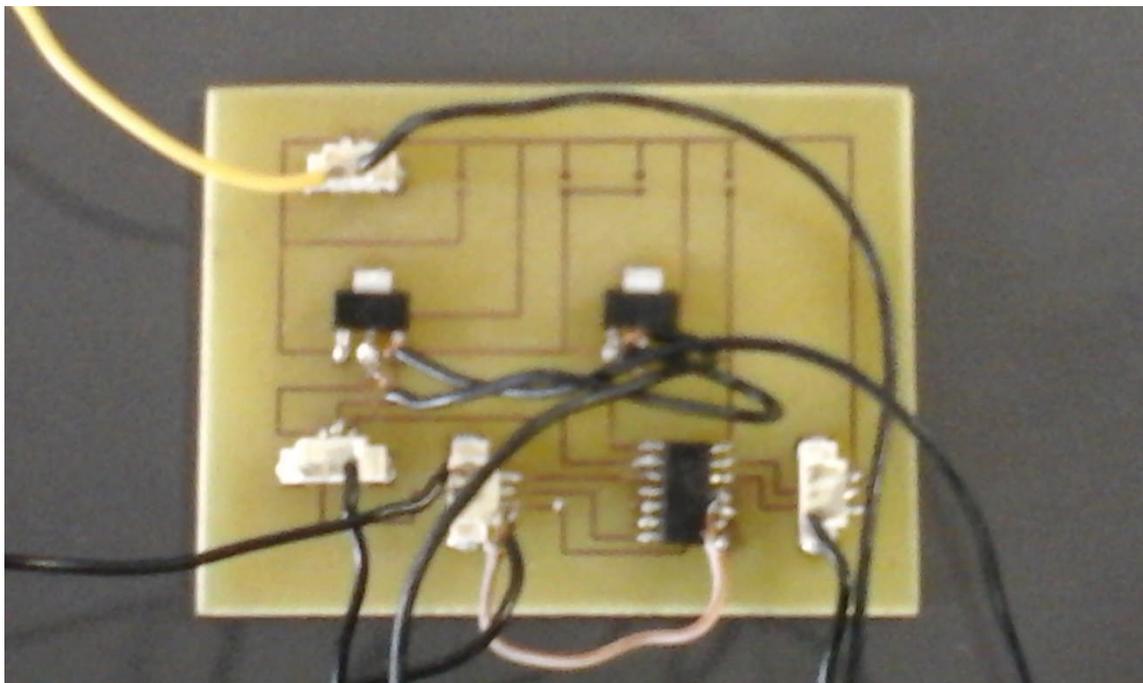


Fig. 4.11. Nuestra placa interfaz implementada en forma artesanal.

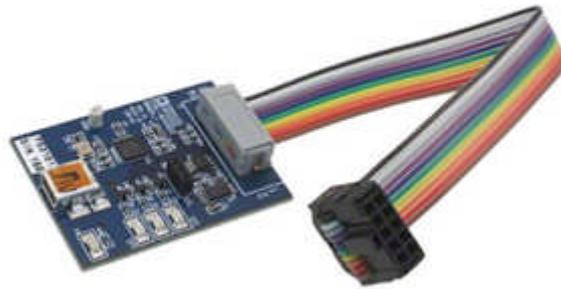


Fig. 4.13. Placa de control de interfaz USBi.

En la Fig. 4.14 podemos observar el diagrama de bloques funcional de la placa de evaluación EVAL-ADAU1701MINIZ.

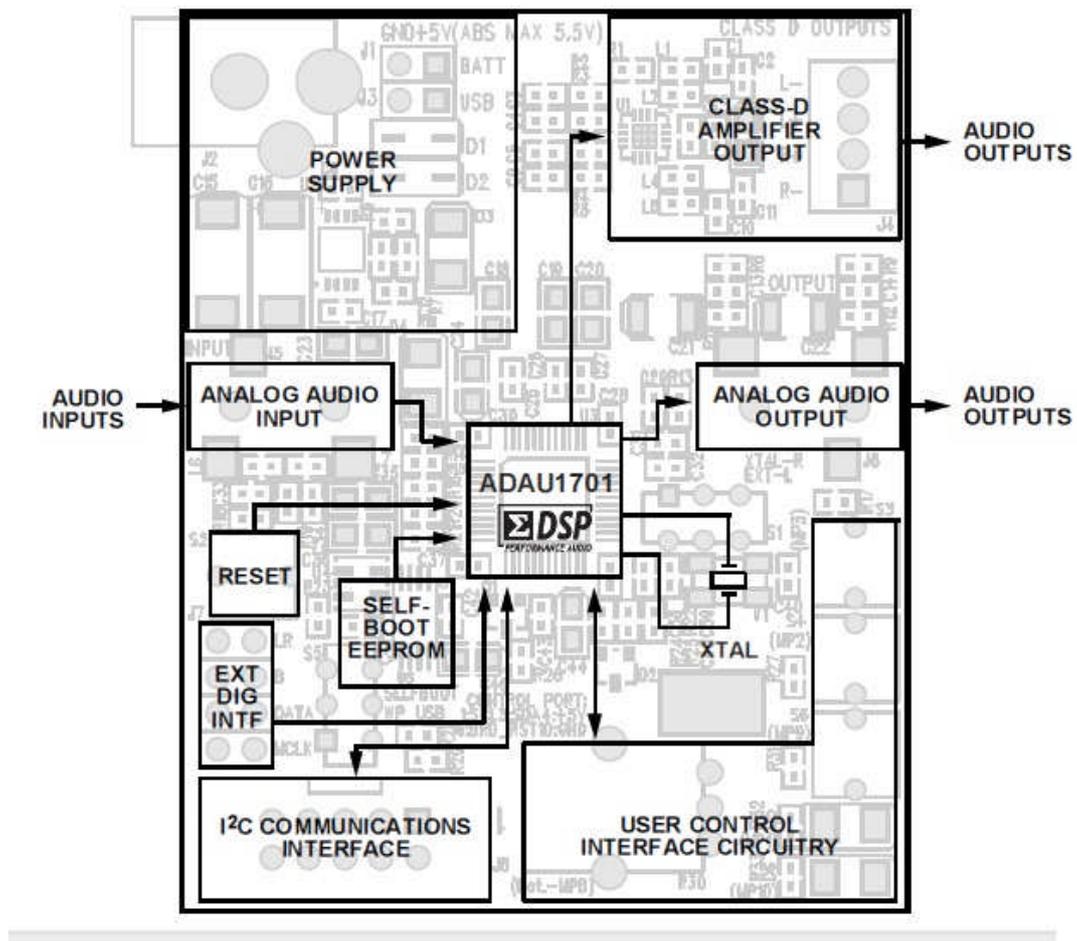


Fig. 4.14. Diagrama de bloques funcional de EVAL-ADAU1701MINIZ.

Para nuestro theremin digital emplearemos los siguientes bloques de la EVAL-ADAU1701MINIZ que aparecen en la Fig. 4.14:

- **ADAU1701 SIGMADSP**

El núcleo del ADAU1701 es un DSP de 28 bits (56 bits con procesamiento de doble precisión) optimizado para procesamiento de audio. Los programas y parámetros pueden cargarse con un flujo de señal de procesamiento de audio a medida, construido por el software de programación gráfica SigmaStudio de la empresa Analog Devices. Los valores almacenados en los parámetros controlan bloques individuales de procesamiento de señal, tales como filtros de ecualización, procesadores dinámicos, delays de audio, y niveles de mezclador.

- **Fuente De Alimentación (POWER SUPPLY)**

La fuente de alimentación consiste de un regulador DC ADP3336 que convierte de 5 voltios a 3.3 voltios, filtrado, y un indicador LED. Las resistencias y capacitor conectados al pin de realimentación del ADP3336 establecen el voltaje de salida. La energía puede proporcionarse desde la placa USBi (desde los 5 voltios del puerto USB), desde una fuente de 5 voltios externa o desde una batería.

Cuando está energizada la EVAL-ADAU1701MINIZ, el LED D3 ilumina color verde. La circuitería digital del ADAU1701 opera de una fuente de 1.8 voltios generada desde el circuito integrado regulador y el transistor de paso Q1.

- **Salida Analógica De Línea De Audio (ANALOG AUDIO OUTPUT)**

El ADAU1701 incluye cuatro DACs sigma-delta. La SNR del DAC es 104 dB y la THD +N es -90 dB. La salida a escala completa en el DAC es 0.9 V rms (2.5 V p-p).

Los DACs están en configuración invertida. Si no se desea inversión de señal de la entrada a la salida, se puede revertir sólo con invertir la señal en el flujo de programa del DSP del ADAU1701.

DAC2 y DAC3 están conectados a un filtro paso bajo pasivo de un solo polo con una frecuencia de esquina de 50 kHz, lo cual es suficiente para filtrar el ruido fuera de banda del DAC.

- **Entrada Externa De Audio Digital (EXT DIG INTF)**

Para usar el puerto de entrada de audio digital del ADAU1701, las señales de serial data, BCLK, y LRCLK deben estar conectadas a una fuente externa usando la cabecera. La fuente necesita estar en sincronía con el ADAU1701, así, el MCLK debería ingresar a esta cabecera también. En la cabecera, la fila de pines junto al borde de la placa son tierra y la fila de pines internos son las señales.

Sin embargo, nosotros usaremos estos pines no como entrada de audio digital, sino como entrada para nuestras dos señales PWM de 3.3 voltios provenientes de la placa interfaz. De este modo ingresan al ADAU1701 las señales PWM originadas en los sensores de ultrasonidos y que se encargarán de controlar a la señal de audio sintetizada en el DSP en su tono y volumen.

- **Cabecera De Comunicaciones I²C (I²C COMMUNICATIONS INTERFACE)**

La cabecera de comunicaciones I²C conecta el puerto de comunicaciones del ADAU1701. Junto con las señales I²C, la cabecera incluye la señal reset del DSP y la señal power del bus USB. Por lo general, se conecta a esta cabecera la USBi (EVAL-ADUSB2) para habilitar las comunicaciones con el software SigmaStudio.

IV.6. SÍNTESIS DE LA SEÑAL DE AUDIO

Llegados hasta este punto sólo disponemos de dos señales de control en forma de señal PWM que ingresan a la placa DSP, es decir poco o nada de lo que pudiera parecer un theremin a simple vista. Eso es porque todos los bloques funcionales típicos de todo theremin se encuentran programados en el chip DSP mediante el software SigmaStudio de Analog Devices.

En la Fig. 4.15 se observa el código gráfico básico del theremin realizado en SigmaStudio, el cual contiene los bloques mínimos necesarios para controlar el tono y el volumen de la señal de audio.

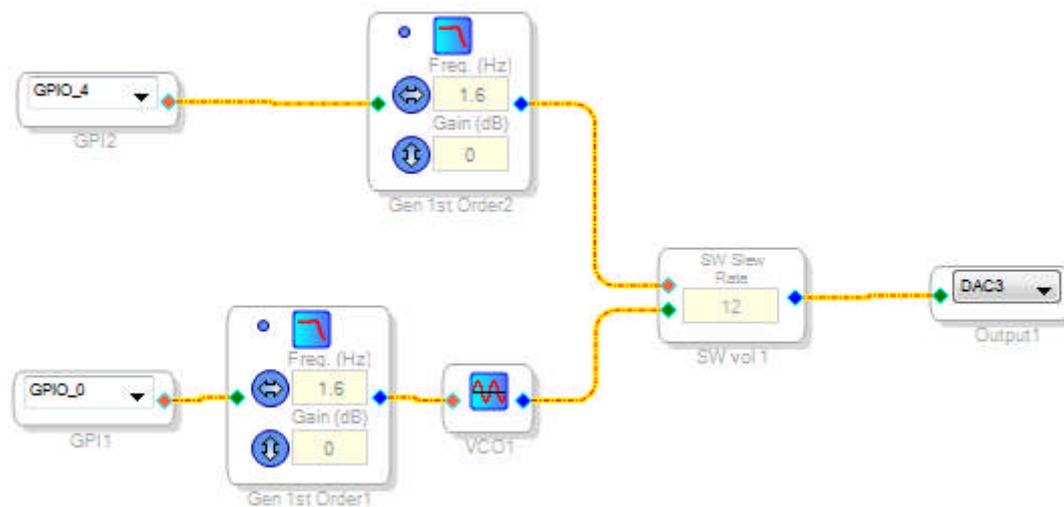


Fig. 4.15. Código gráfico básico de un theremin.

El principio de funcionamiento de la Fig. 4.15 es el siguiente: los pulsos de eco (señales PWM que provienen desde los sensores de ultrasonidos) y que ingresan a la placa DSP, están representados por los bloques GPIO_0 y GPIO_4 que son entradas digitales. Ambas señales de entrada son filtradas paso bajo con una frecuencia de corte muy baja (1.6 hertz) para extraer únicamente la componente continua del pulso de eco. De este modo obtenemos dos niveles de tensión continua con las que podremos controlar a los otros bloques que sean controlables por voltaje: uno de estos niveles de continua ingresará a la entrada del bloque VCO que es un oscilador controlado por voltaje; el otro nivel de continua ingresará a la entrada de control del bloque Slew Rate (dicho bloque hace la función de un amplificador controlado por voltaje); por la entrada de

señal del bloque Slew Rate ingresará la señal que se obtiene a la salida del bloque VCO. Finalmente, conectamos la salida del bloque Slew Rate al bloque DAC3 que representa al convertor digital analógico de la placa DSP.

Con esto obtenemos, en la salida analógica de línea de audio, una señal senoidal variable en amplitud y frecuencia según la distancia de las manos del intérprete con respecto a los sensores de ultrasonidos. Todo es cuestión ahora de enviar dicha señal de audio a la entrada de un amplificador de potencia de audio, o a unos auriculares, para su escucha.

La placa DSP que utilizamos, EVAL-ADAU1701MINIZ, es una placa de desarrollo para fines didácticos y por lo tanto contiene casi todos sus pines de entrada/salida ya destinados a determinado hardware. Como la señal PWM proveniente de la placa interfaz puede considerarse como señal digital por presentar únicamente dos estados en su valor, podemos aprovechar los pines de entrada que dicha placa DSP tiene asignadas como entrada externa de audio digital (Fig. 4.16).

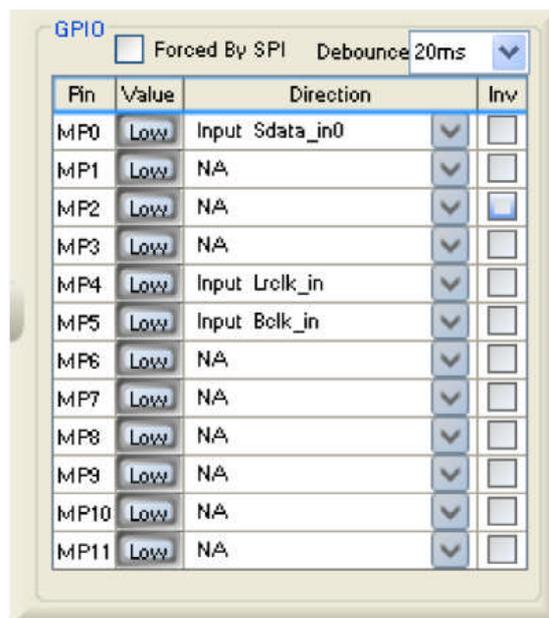


Fig. 4.16. Configuración por defecto de pines de E/S del ADAU1701MINIZ.

Es decir, de los 12 pines de entrada/salida que dispone el ADAU1701 (pines MP0 hasta MP11), la placa EVAL-ADAU1701MINIZ tiene asignados los pines MP0, MP4 y MP5 como entrada externa de audio digital y conectados físicamente a sus respectivos conectores. Bastará con elegir dos de estos pines, en nuestro caso hemos elegido los pines MP0 y MP4, y configurarlos como entrada de propósito general (GPIO) tal como se muestra en la Fig. 4.17. Es muy importante seleccionar en MP0 y en MP4 la opción “No Debounce”, que quiere decir “Sin Antirrebotes”.

Porque si se selecciona la opción “Debounce” (ver ejemplo de MP9 en la Fig. 4.17) se deformará la señal PWM que ingrese por ese pin.

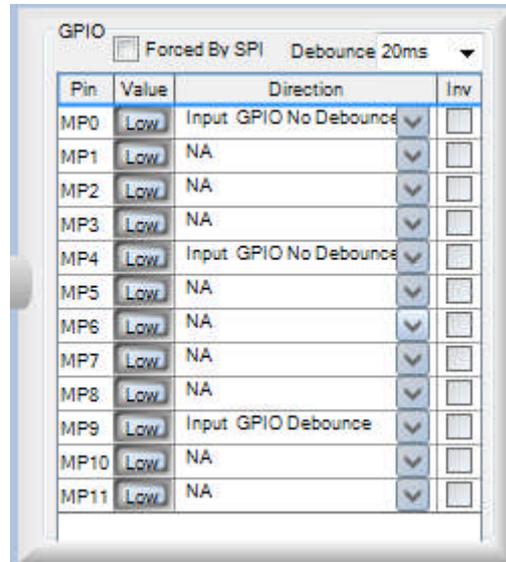


Fig. 4.17. Configuración apropiada de pines de E/S del ADAU1701MINIZ.

Naturalmente que conseguir un theremin funcionando perfectamente con un código tan simple como el de la Fig. 4.15 sería demasiado idealista. Todavía es necesario añadir más bloques para asegurar la puesta a punto y correcta calibración del instrumento. Por ejemplo, debemos asegurarnos de que el DSP reproduzca únicamente señales de audiofrecuencia y nunca ultrasonidos; porque el bloque VCO puede reproducir señales con frecuencias comprendidas en un rango desde 0 Hz hasta la mitad del valor de su frecuencia de muestreo ($f_s/2$), sólo dependiendo del valor numérico que tenga en su pin de entrada. A continuación iremos analizando paso a paso las mejoras realizadas al código gráfico básico.

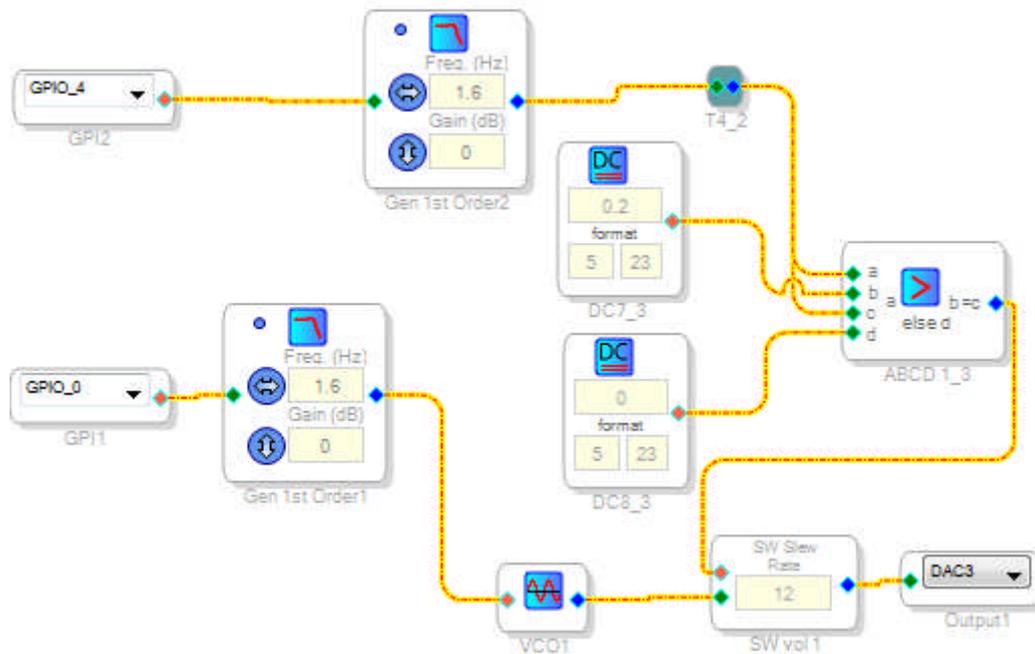


Fig. 4.18. Código gráfico del theremin con generador de silencio.

Ningún theremin puede considerarse como “serio” si no ofrece al intérprete la facultad de dividir los tonos de distinta frecuencia en notas definidas. Esto se consigue generando silencios entre los tonos; silencios que son generados por el intérprete desde el sensor de volumen. En los diseños de Termen y Moog se empleaba para esto circuitería analógica especializada, pero nosotros lo haremos por software, mediante los bloques añadidos al código gráfico básico tal como se observa en la Fig. 4.18. El principio de funcionamiento es el siguiente: se comparan el nivel de continua a la salida del filtro y que es proporcional a la señal PWM del sensor de volumen, con un nivel de continua fijo representado por el bloque fuente DC; si el valor que proviene del sensor de volumen es menor que este valor fijo umbral, se enviará inmediatamente un nivel de continua de cero voltios a la entrada de control del bloque amplificador controlado por voltaje (representado por el bloque SW Slew Rate), lo que generará el silencio deseado. Si, por el contrario, el valor que proviene del sensor de volumen es mayor que el valor fijo umbral, el bloque amplificador controlado por voltaje será controlado directamente por este mismo nivel de continua proporcional a la señal PWM del sensor de volumen.

De modo que todo lo que debe hacer el intérprete para generar un silencio es acercarse a la mano izquierda al sensor de volumen lo suficiente hasta que su valor de continua proporcional resulte menor al valor umbral.

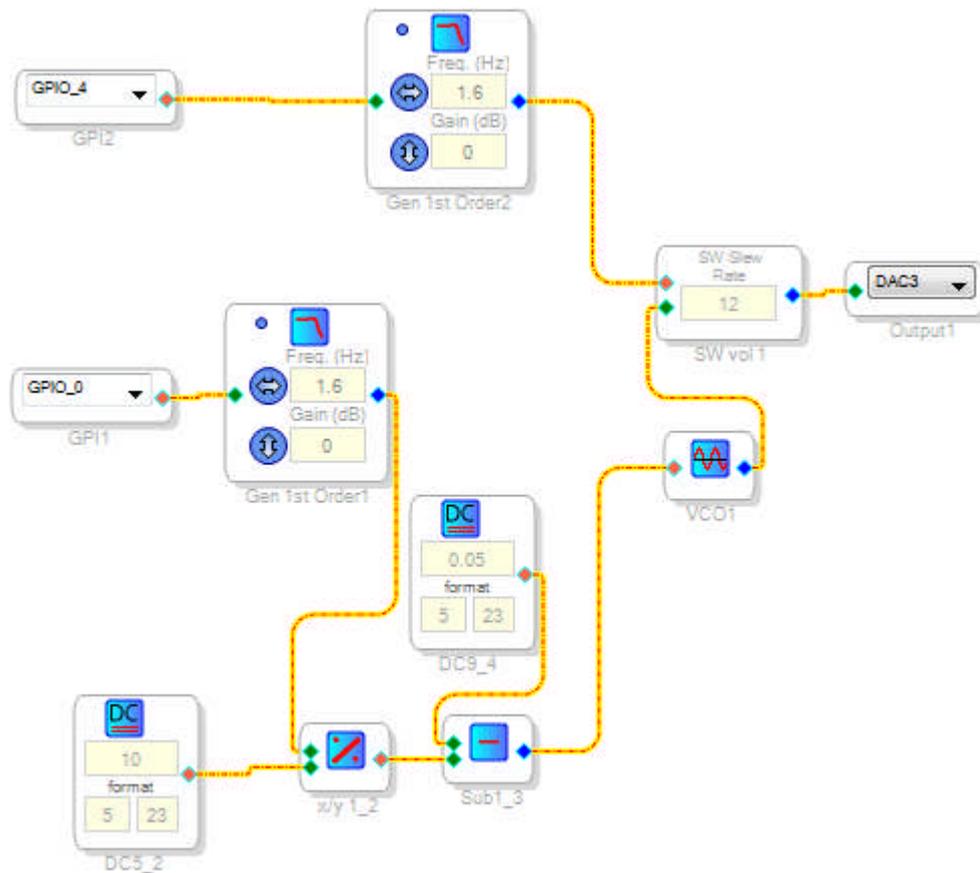


Fig. 4.19. Código gráfico para aumentar la frecuencia al acercarse al sensor de tono.

Por simplicidad, dejaremos los bloques encargados del control de volumen tal como aparecen en el código gráfico básico del theremin de la Fig. 4.15, ya que ahora nos ocuparemos solamente del control de tono.

Como habíamos mencionado anteriormente, debemos asegurarnos de reproducir únicamente señales de audiofrecuencia y nunca fuera de este rango, ya que el bloque oscilador controlado por voltaje genera las frecuencias según el valor numérico en su pin de entrada: desde 0 para 0 Hz hasta 1 para $fs/2$ Hz, y cualquier valor entre 0 y 1 para obtener frecuencias intermedias entre 0 Hz y $fs/2$ Hz.

En el momento de realizar las pruebas durante la etapa de experimentación, se encontró que el nivel de continua obtenido a la salida del filtro pasabajos proporcional a la señal PWM del sensor de tono era todavía demasiado alto, lo que originaba que el oscilador controlado por voltaje se saliera del rango de las audiofrecuencias. Por este motivo se empleó un bloque de división para reducir este valor y llevarlo al valor correcto.

En el diseño clásico del theremin con válvulas desarrollado por Lev Termen el tono aumentaba conforme la mano del intérprete se iba acercando a la antena de control de tono. Esta característica fue mantenida en el diseño de theremin con transistores de Robert Moog. Con tantos años transcurridos durante los cuales se ha venido ejecutando el theremin, esta característica se volvió intrínseca sobretodo en cuanto al desarrollo de la técnica de ejecución del instrumento por parte de los intérpretes. De tal modo que ya no se concibe un theremin cuyo sentido del aumento de su tono o frecuencia no sea cuando uno se aproxima a la antena o sensor que se esté utilizando.

Como el duty cycle de la señal PWM del sensor de ultrasonidos disminuye conforme la mano se acerca al sensor, al ser filtrada esta señal originará un nivel de continua menor. Por consiguiente, al ir conectada la salida del filtro pasabajos directamente a la entrada del bloque oscilador controlado por voltaje, originará un tono que será más alto conforme la mano del intérprete se vaya alejando del sensor de tono, es decir, lo contrario de lo que queríamos.

Para revertir esta situación, utilizaremos el bloque de substracción con el cual le restaremos a un nivel de continua fijo, el nivel de continua proporcional a la señal PWM del sensor de tono. De esta manera conforme la mano del intérprete se va acercando cada vez más al sensor de tono, el duty cycle de su señal PWM será cada vez menor y el nivel de continua obtenido al ser filtrada esta señal será cada vez menor; como este nivel de continua se resta a un nivel de continua de valor fijo, se obtendrá a la salida del bloque de substracción un nivel de continua con un valor cada vez mayor, el cual al ingresar por el pin de entrada del bloque oscilador controlado por voltaje generará un tono con frecuencia cada vez más alta.

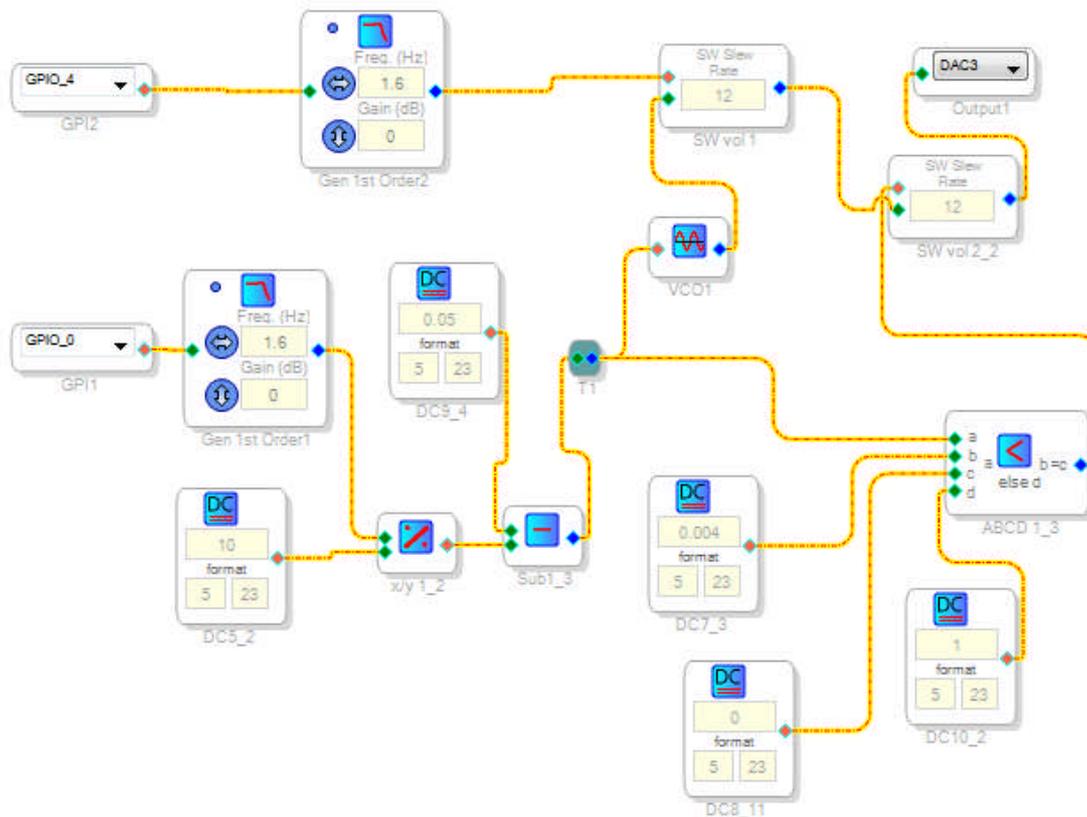


Fig. 4.20. Código gráfico de theremin con generador de Zero Beat.

Continuando con el control de tono, existe otra característica que todo theremin que se considere “serio” posee, y es la de producir sonido únicamente cuando el intérprete se encuentra dentro de la denominada zona de control del instrumento, por lo general a una distancia un poco menor a un metro. Es lo que en el theremin analógico clásico se conoce como “Zero Beat”, obtenido cuando la frecuencia del oscilador variable es igual o casi igual a la del oscilador fijo, y el intérprete lo controlaba variando la frecuencia del oscilador fijo, por lo general girando un potenciómetro.

Nosotros implementaremos y controlaremos el “Zero Beat” mediante software. El principio de funcionamiento es el siguiente: el nivel de tensión continua que ingresa a la entrada del oscilador controlado por voltaje es comparado con un valor de continua umbral; la salida del bloque comparador va conectada al pin de control de un segundo bloque amplificador controlado por voltaje cuyo pin de entrada de señal es la salida del primer bloque amplificador controlado por voltaje. Entonces, si el nivel de continua proporcional al sensor de tono es menor que el umbral, el pin de control del segundo bloque amplificador controlado por voltaje recibirá un cero y no se percibirá sonido alguno, todo esto ocurrirá siempre que el intérprete se encuentre, con respecto al

sensor de tono, a una distancia superior a la determinada por el valor umbral y que llamaremos zona de control del theremin. Si por el contrario, el intérprete se ubica dentro de la zona de control del theremin, entonces el nivel de continua proporcional al sensor de tono es mayor que el umbral y el pin de control del segundo bloque amplificador controlado por voltaje recibirá un uno, con lo cual el theremin funcionará normalmente.

Agrupando en un solo código todas las mejoras concernientes al control de tono y al control de volumen, obtenemos el código gráfico completo del theremin digital que se observa en la Fig. 4.21; este código contiene: control de tono, control de volumen, generador de silencios, generador de Zero Beat, colocación de la señal en el rango de audiofrecuencia y determinación del sentido de aumento del tono.

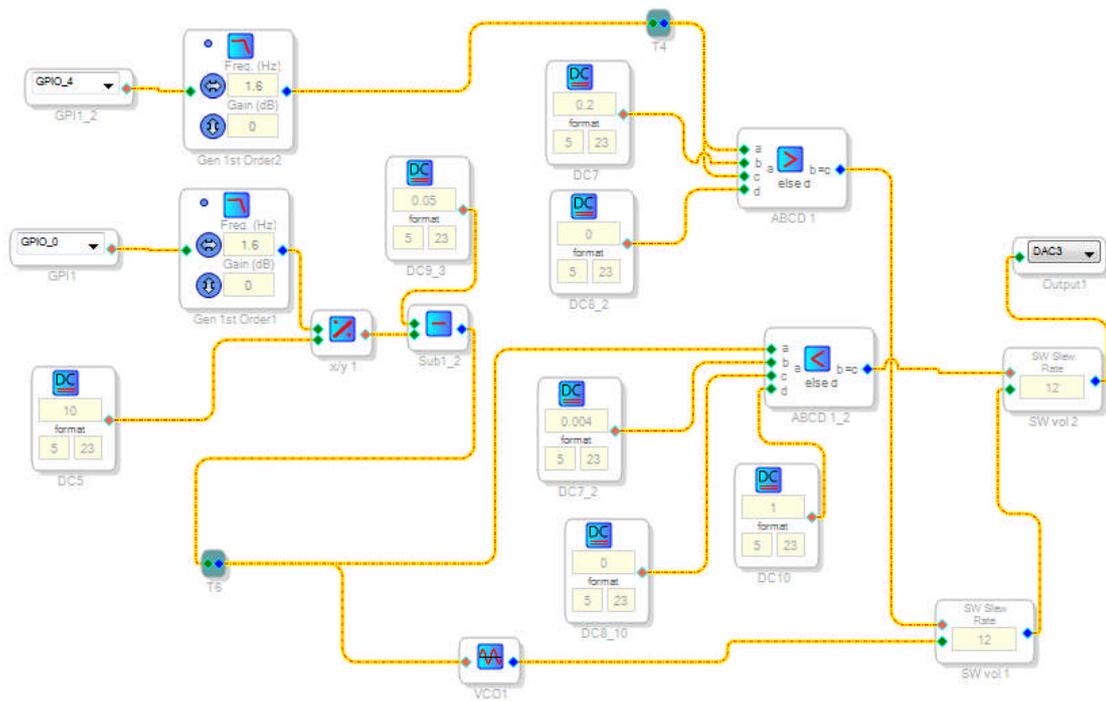


Fig. 4.21. Código gráfico completo del theremin digital.

IV.7. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA MECÁNICA DEL THEREMIN DIGITAL

Para el diseño de la estructura mecánica de nuestro theremin digital se ha utilizado el software libre de diseño mecánico FreeCAD. Las dimensiones elegidas fueron 22 cm por 16,5 cm y una altura de 6,5 cm para tener un instrumento musical que fuera fácilmente transportable. Como se observa en la Fig. 4.22, presenta en la tapa una pequeña torre para colocar uno de los sensores de ultrasonidos. Asimismo, la estructura presenta en su parte frontal un conector jack para la salida de audio que deberá ingresar a un amplificador de potencia de audio.

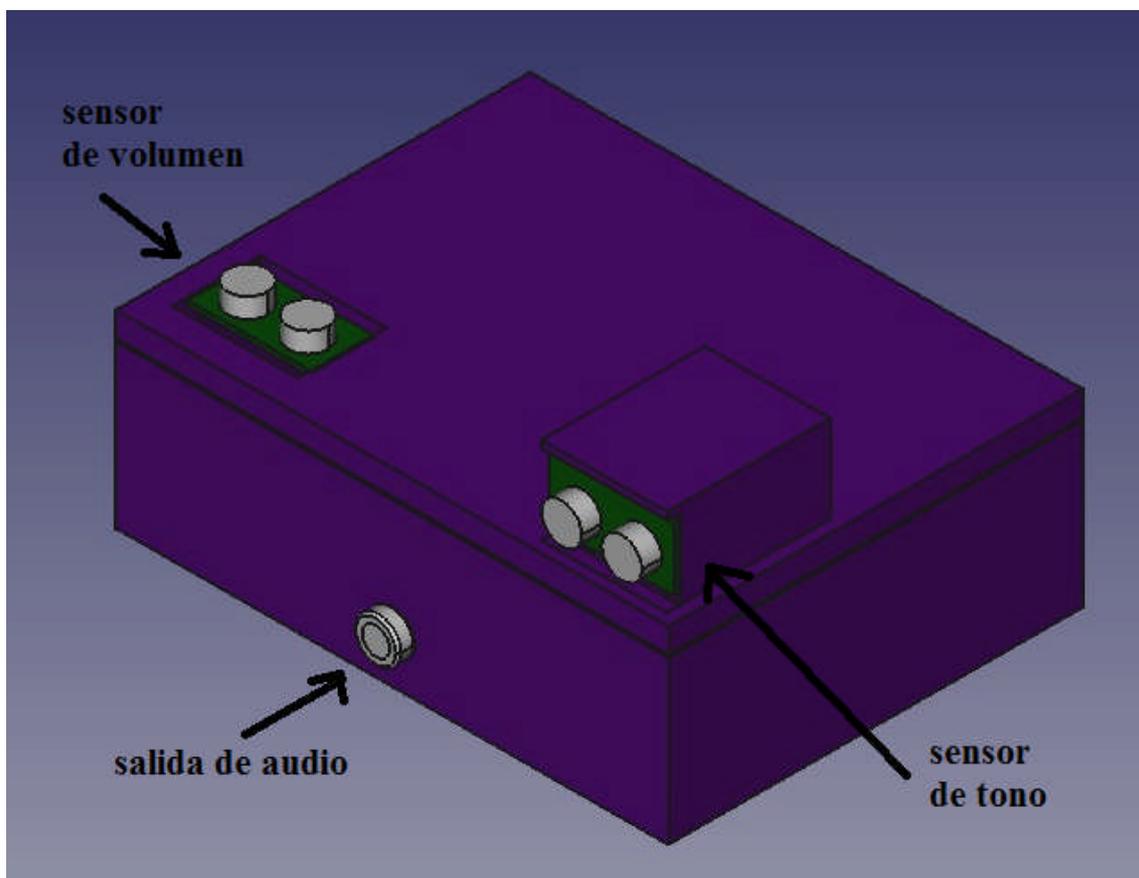


Fig. 4.22. Estructura mecánica del theremin digital.

En la Fig. 4.23 se muestra el conector de red el cual se encuentra ubicado en la parte trasera de la estructura mecánica de nuestro theremin digital. Aquí se conectará con una fuente de alimentación de 9 voltios.

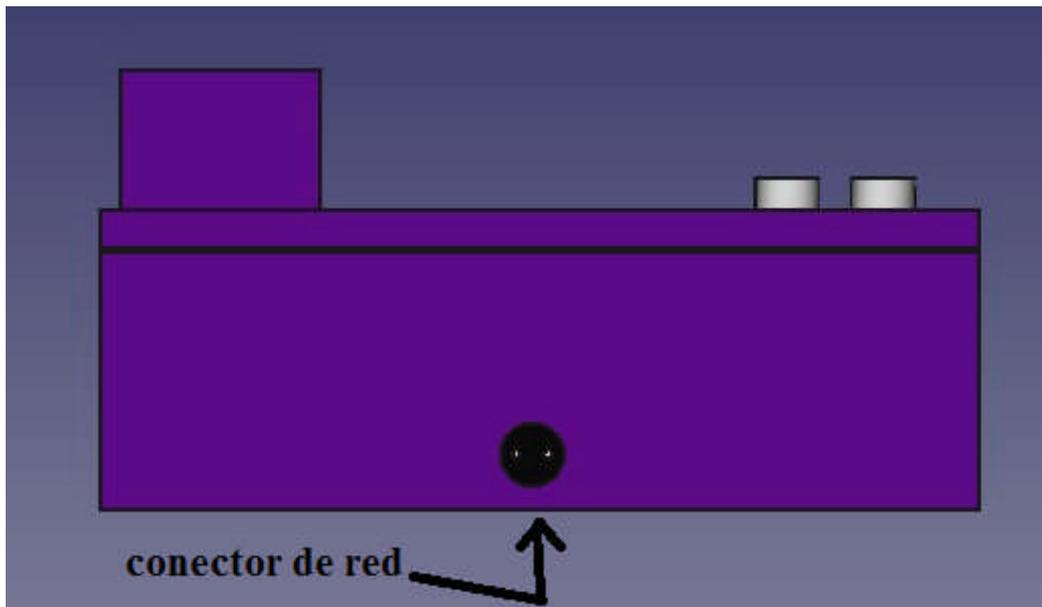


Fig. 4.23. Vista trasera de la estructura mecánica del theremin digital.

Esta estructura mecánica además de alojar y proteger físicamente a las placas que implementamos, sirve para ubicar correctamente los sensores de ultrasonidos de modo que puedan cumplir su función como sensor de tono y como sensor de volumen respectivamente.

Es decir, el sensor de tono va colocado en posición vertical de tal modo que en la palma de la mano derecha del ejecutante reboten las ondas ultrasónicas lanzadas desde el bloque transmisor del módulo sensor de ultrasonidos e ingresen al bloque receptor del mismo, tal como se muestra en la Fig. 4.24, mientras más cerca del módulo sensor se hagan rebotar las ondas ultrasónicas más agudo será el sonido producido por el instrumento y, por el contrario, mientras más lejos del módulo sensor se hagan rebotar las ondas ultrasónicas más grave será el sonido producido por el instrumento, hasta llegar a un silencio absoluto cuando la mano derecha del ejecutante se encuentre fuera de la zona de operación del theremin digital.

El sensor de volumen va colocado en posición horizontal mirando hacia arriba, la palma de la mano del ejecutante se coloca por encima de este sensor, desde una distancia máxima que se corresponde con el máximo volumen, hasta una distancia de unos cuantos centímetros para mínimo volumen. De este modo también es más fácil generar los silencios sólo con colocar la mano izquierda del ejecutante por encima de la posición de mínimo volumen y luego doblando la muñeca hacia abajo. Así se obtienen unos silencios inmediatos, imprescindibles para dividir el tono continuo (que de por sí genera el theremin) en notas separadas.

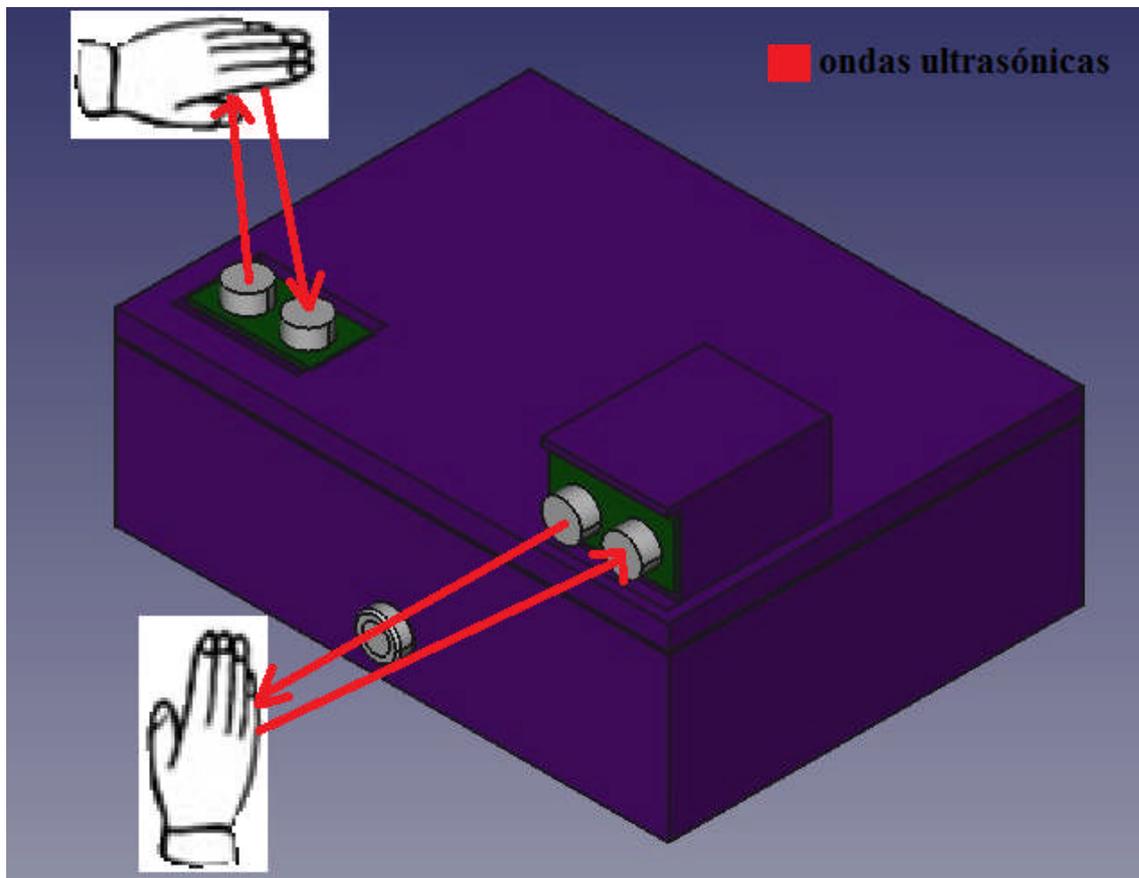


Fig. 4.24. Modo de funcionamiento del theremin digital.

V. CONCLUSIONES

Desde el primer momento el propósito de este trabajo ha sido proponer un nuevo diseño para la construcción del theremin. Un diseño original que utilizara los componentes electrónicos más modernos, del mismo modo que Robert Moog rediseñó el theremin a mediados del siglo pasado utilizando transistores y circuitos integrados analógicos para reemplazar a las válvulas o tubos de vacío del diseño original de Lev Termen.

En nuestro caso la idea fue alejarse de lo analógico y crear un diseño enteramente digital, empleando un procesador digital de señales para la síntesis de sonidos musicales (en los diseños clásicos esto se hacía utilizando electrónica analógica discreta), y microcontroladores para el control del músico sobre el instrumento (en los diseños clásicos mediante antenas y grandes bobinas).

En el diseño de todo theremin, ya sea analógico o digital, lo más importante son estos dos aspectos que acabamos de mencionar:

- 1) La síntesis de las notas musicales, es decir la propia “voz” del instrumento y que el sonido generado por éste sea agradable.
- 2) La precisión en el control del músico sobre el instrumento, es decir que el instrumento permita un control preciso al músico.

Con respecto al primer punto, consideremos que el sonido del theremin original de Lev Termen era creado empleando osciladores senoidales implementados con tubos de vacío, lo que le añadía suficiente contenido armónico a la onda senoidal de audiofrecuencia para generar un sonido agradable. En nuestro caso el DSP genera una onda senoidal de audiofrecuencia sin contenido armónico y se nota la diferencia en el sonido del theremin digital, siendo el sonido del theremin clásico mucho más rico. Sin embargo, esto puede compensarse conectando la señal senoidal de audiofrecuencia de salida del theremin digital a una pedalera de efectos de guitarra, la cual se encargará de añadir ese contenido armónico que necesita la señal senoidal pura para enriquecer su sonido.

Con respecto al segundo punto, puede afirmarse que en general el control del theremin digital es bastante bueno, principalmente en lo que se refiere al control de volumen, a su capacidad de producir silencios que posibiliten dividir el tono continuo en notas separadas, y a la determinación de la zona de control del instrumento. No obstante, un thereminista clásico acostumbrado a las antenas para controlar el sonido notará diferencias al momento de controlar el theremin digital con los sensores de ultrasonidos.

Quizá el thereminista no note diferencia en el control de volumen del theremin digital comparado con el theremin clásico analógico, ya que el modo de funcionamiento de ambos es muy parecido; pero sí notará diferencia en el control de tono del theremin digital.

Porque las características propias de un sensor de ultrasonidos para medición de distancias lo hacen muy distinto de un sensor de antena.

El sensor de ultrasonidos es un sensor activo, en el cual se transmite constantemente una ráfaga ultrasónica y se recibe el eco de la misma, originando un solo grado de libertad para el músico: principalmente el movimiento hacia atrás y hacia delante de la mano, aunque es capaz de generar el efecto de vibrato moviendo la mano muy rápidamente hacia los lados.

La antena es un sensor pasivo en el cual es detectada cualquier interferencia, como la mano del músico, dentro del rango de acción de la antena (casi 360 grados alrededor de la misma) variando así la frecuencia del sonido.

Esto podría propiciar un cambio violento en la técnica actual de ejecución del theremin y quizá esto sea muy pretencioso. Sólo el tiempo lo dirá.

V.1. TRABAJOS FUTUROS

A continuación se proponen mejoras al theremin digital que hemos diseñado en este trabajo:

Como primera propuesta se plantea rediseñar el theremin digital ya no como un instrumento musical que genera su propia voz, sino como un controlador MIDI. Es decir, quitarle la tarea al theremin de sintetizar el sonido, y dejar que de esto se encarguen los ordenadores y los sintetizadores que están mejor equipados para ello. Para este diseño sólo se van a requerir las etapas conformadas por los sensores de ultrasonidos y los microcontroladores, sin el DSP.

Como segunda propuesta se plantea el cambio del sensor de ultrasonidos por un sensor de antena construido empleando circuitería analógica y el DSP ADAU1701, tal como se aprecia en la Fig. 5.1. El sistema se basa en el principio físico de la **resonancia**, en la cual una señal de alta frecuencia proveniente de un oscilador, que alimenta a un circuito tanque LC [16], presentará amplitud máxima en el tanque si la frecuencia natural del tanque se encuentra en resonancia con la del oscilador de alta frecuencia, es decir si la frecuencia natural del tanque es igual o muy cercana a la frecuencia del oscilador. Y, por el contrario, cuanto más lejos se encuentre la frecuencia natural del tanque de la del oscilador, menor será la amplitud de la señal de alta frecuencia en el tanque.

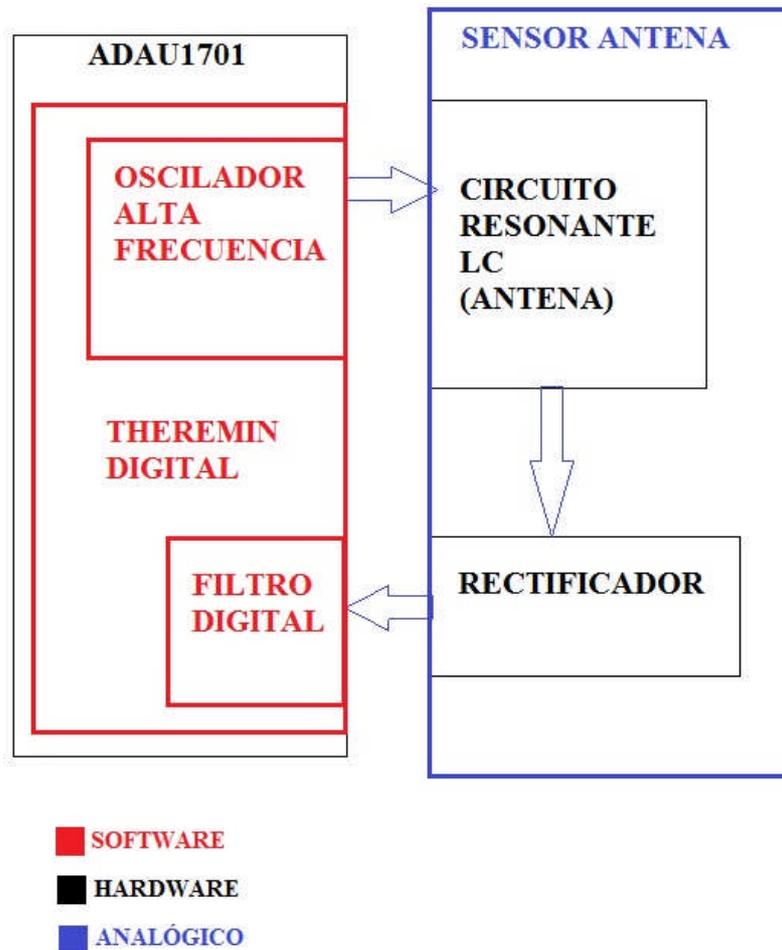


Fig. 5.1. Diagrama de bloques del theremin digital controlado por antena.

Entonces, sobre la base de los diseños clásicos de theremin, tanto de Termen como de Moog, puede construirse un circuito tanque LC que consista en una gran bobina conectada de tal forma con un capacitor variable, formado por la antena y la mano del intérprete, que al valor alto de inductancia de la bobina le afecten los pequeños cambios en capacitancia del capacitor variable, que suceden cuando la mano del intérprete se acerca o se aleja de la antena, cambiando así la frecuencia natural del circuito tanque. Como el circuito tanque es alimentado por un oscilador cuyo valor de frecuencia es justamente la frecuencia natural del tanque, se obtendrá en el tanque una señal de alta frecuencia cuya amplitud varía al acercarse o alejarse la mano de la antena.

Mediante los procesos de rectificación [17] y filtrado sobre esta señal de amplitud variable, se obtiene el nivel de continua correspondiente a la amplitud de la señal en determinado instante, nivel que es utilizado en nuestro código gráfico del theremin digital, dentro del chip DSP, para controlar a los bloques oscilador controlado por voltaje y amplificador controlado por voltaje.

En el diagrama de bloques de la Fig. 5.1 se indican las etapas que pueden implementarse mediante software en el DSP (color rojo en el diagrama) y las que necesariamente requieren ser implementadas en hardware (color negro en el diagrama). De la misma manera, el color azul indica las etapas que son analógicas para diferenciarlas del resto que es digital. Podemos aprovechar el chip DSP para implementar los osciladores de alta frecuencia y los filtros digitales, que ya han sido probados con éxito durante el desarrollo de este trabajo.

Hay que tener en consideración que la máxima frecuencia que puede generar el oscilador digital del DSP utilizado es 98 kHz, correspondiente a la frecuencia de muestreo máxima sobre dos. Se debe considerar también la alimentación de la etapa analógica, por ejemplo en el diseño de Moog se empleaba ± 12 voltios.

En cuanto al bloque rectificador, estará conformado principalmente por un diodo y entregará una señal pulsante positiva al conversor analógico digital del DSP ADAU1701 para ser filtrada digitalmente.

En la Fig. 5.2 se muestra el código gráfico de un theremin digital controlado por dos antenas, una para controlar el tono y la otra para controlar el volumen. En su mayoría el código es muy similar al theremin digital ultrasónico propuesto en este trabajo. Entre las novedades se destacan las siguientes:

El oscilador de alta frecuencia fijo consiste de un bloque VCO de la herramienta gráfica de desarrollo SigmaStudio, cuya salida se dirige a su respectivo conversor digital analógico (DAC0 ó DAC1). La señal pulsante proveniente del rectificador ingresa al DSP por el pin que ingresa al conversor analógico digital (AUX_ADC_0 para controlar el volumen ó AUX_ADC_1 para controlar el tono).

Además el “Zero Beat” podrá ser determinado por el usuario girando un potenciómetro conectado a la entrada AUX_ADC_2. De la misma manera, la altura a la cual se genera el silencio podrá ser determinada por el usuario girando otro potenciómetro conectado a la entrada AUX_ADC_3. Un conmutador conectado al pin de entrada GPIO_0 posibilita que el theremin reproduzca sólo notas graves a modo de bajo.

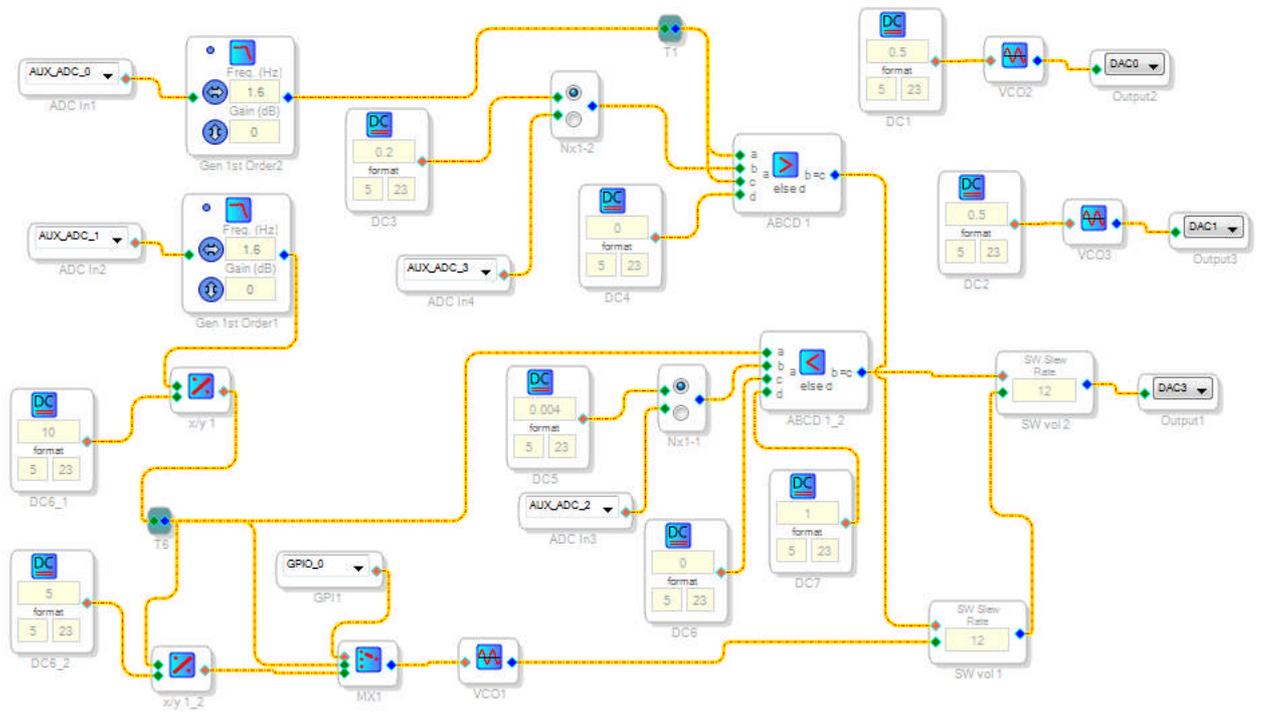


Fig. 5.2. Código gráfico del theremin digital controlado por antena.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Departamento de Ingeniería Electrónica del Campus de Gandía de la Universidad Politécnica de Valencia y al grupo encargado de sus laboratorios, los técnicos: Francisco José Ibáñez Sabater, Antoni Bou Escrivà y Enrique Späth Lleó, por haberme facilitado equipos y las instalaciones, sin los cuales no hubiera podido realizar mi proyecto.

A mi tutor José Francisco Toledo Alarcón en primer lugar por su interés en el theremin, y sobretodo por su participación activa y buenos consejos en la elaboración de esta tesis; a José Marín-Roig Ramón por la ayuda y colaboración, y a todos aquellos que participaron directa e indirectamente en la ejecución de este trabajo.

REFERENCIAS DE FIGURAS Y TABLAS

Todas las figuras, con excepción de las que indican la fuente de procedencia, son creación del autor de este trabajo.

Capítulo 1:

Fig. 1.1 Envolvente de una onda sonora. ¹

Fig. 1.2 Construyendo una onda cuadrada a partir de ondas senoidales armónicas. ²

Fig. 1.3 Aspecto propuesto para nuestro theremin digital.

Fig. 1.4 Señal de audio controlada en frecuencia (a y b) y en amplitud (c y d). ³

¹ Fuente: *The Complete Synthesizer*. Crombie, David; página 30.

² Fuente: *Analog Synthesizers*. Jenkins, Mark; página 6.

³ Fuente: *Analog Synthesizers*. Jenkins, Mark; página 2.

Capítulo 2:

Tabla 1 Especificaciones del sensor de ultrasonidos. ¹

Fig. 2.1 Terminales de conexión del sensor. ²

Fig. 2.2 Señales de transmisión y recepción del sensor de ultrasonidos. ³

Fig. 2.3 Diagrama de pines del microcontrolador PIC16F84A. ⁴

Fig. 2.4 Diagrama de bloques del ADAU1701. ⁵

Fig. 2.5 Diagrama de pines del ADAU1701. ⁶

Fig. 2.6 Editor de esquemático para generación de código gráfico.

Fig. 2.7 Configuración del hardware del procesador de audio SigmaDSP.

Fig. 2.8 Diagramas de (a) pines y (b) bloques, del buffer 74LVC126AD. ⁷

Fig. 2.9 Editor de esquemático del EAGLE.

Fig. 2.10 Editor de layout del EAGLE.

Fig. 2.11 Programa FreeCAD. ⁸

^{1,3} Fuente: *TS601 Data Sheet*. Audiowell Electronics; páginas 1 y 2.

^{2,3} Fuente: *PING Data Sheet*. Parallax; página 1.

⁴ Fuente: *PIC16F84A Data Sheet*. Microchip; página 1.

^{5,6} Fuente: *ADAU1701 Data Sheet*. Analog Devices; páginas 4 y 11.

⁷ Fuente: *74LVC126A Data Sheet*. NXP Semiconductors; página 2.

⁸ Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/FreeCAD>

Capítulo 3:

Fig. 3.1 El mítico Theremin. ¹

Fig. 3.2 Lev Sergeievitch Termen ("León Theremin"). ²

Fig. 3.3 Esquema que muestra el funcionamiento del theremin. ³

Fig. 3.4 Diagrama de bloques del theremin diseñado por Lev Termen. ⁴

Fig. 3.5 León Theremin mostrando la circuitería interior de su instrumento. ⁵

Fig. 3.6 Clara Rockmore. La mejor thereminista de todos los tiempos. ⁶

Fig. 3.7 Theremin transistorizado. ⁷

Fig. 3.8 Robert Arthur Moog. ⁸

Fig. 3.9 Circuito equivalente de la capacitancia de la mano. ⁹

Fig. 3.10 Diagrama de bloques del theremin transistorizado. ¹⁰

¹ Fuente: <http://rcatheremin.com/61soviet.php>

² Fuente: <http://www.thereminworld.com>

^{3,6} Fuente: <http://theremin.us>

⁴ Fuente: <http://lydiakavina.com/theremin.html>

⁵ Fuente: <http://www.electrospectivemusic.com/leon-theremin-1896-1993>

^{7,8} Fuente: <http://www.moogmusic.com>

^{9,10} Fuente: *ETHERWAVE THEREMIN Data Sheet*. Moog Music, Inc.; página 2.

Capítulo 4:

Fig. 4.1 Diagrama de bloques del theremin digital.

Fig. 4.2 Diagrama esquemático de la placa sensor.

Fig. 4.3 Placa de circuito impreso de la placa sensor.

Fig. 4.4 Vista 3D de la placa de circuito impreso de la placa sensor.

Fig. 4.5 Nuestras dos placas sensor implementadas en forma artesanal.

Fig. 4.6 Modo en que el microcontrolador interactúa con el sensor de ultrasonidos. ¹

Fig. 4.7 Diagrama de flujo del programa para controlar los sensores.

Fig. 4.8 Diagrama esquemático de la placa interfaz.

Fig. 4.9 Placa de circuito impreso de la interfaz.

Fig. 4.10 Vista 3D de la placa de circuito impreso de la interfaz.

Fig. 4.11 Nuestra placa interfaz implementada en forma artesanal.

Fig. 4.12 Placa de evaluación EVAL-ADAU1701MINIZ. ²

Fig. 4.13 Placa de control de interfaz USBi. ³

Fig. 4.14 Diagrama de bloques funcional de EVAL-ADAU1701MINIZ. ⁴

Fig. 4.15 Código gráfico básico de un theremin.

Fig. 4.16 Configuración por defecto de pines de E/S del ADAU1701MINIZ. ⁵

Fig. 4.17 Configuración apropiada de pines de E/S del ADAU1701MINIZ.

Fig. 4.18 Código gráfico del theremin con generador de silencio.

Fig. 4.19 Código gráfico para aumentar la frecuencia al acercarse al sensor de tono.

Fig. 4.20 Código gráfico de theremin con generador de Zero Beat.

Fig. 4.21 Código gráfico completo del theremin digital.

Fig. 4.22 Estructura mecánica del theremin digital.

Fig. 4.23 Vista trasera de la estructura mecánica del theremin digital.

Fig. 4.24 Modo de funcionamiento del theremin digital.

¹ Fuente: *PING Data Sheet*. Parallax; página 1.

^{2,3} Fuente:

<http://www.element14.com/community/servlet/JiveServlet/showImage/98772/Picture1.png>

^{4,5} Fuente: *EVAL-ADAU1701MINIZ Data Sheet*. Analog Devices; páginas 1 y 6.

Capítulo 5:

Fig. 5.1 Diagrama de bloques del theremin digital controlado por antena.

Fig. 5.2 Código gráfico del theremin digital controlado por antena.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Jenkins, *Analog Synthesizers*. Focal Press, 1ª Edición, 2007.
- [2] D. Crombie, *The Complete Synthesizer: A Comprehensive Guide*. 1984.
- [3] Radio-Victor Corporation of America, *RCA Theremin Service Notes*. 1929.
- [4] Moog Music Inc., *Understanding, customizing and hot-rodding your Etherwave Theremin*. 2003.
- [5] *The Glasgow Digital Theremin*. <http://www.theremin.us/Glasgow/glasgow.html>
- [6] V. Dávila, *Diseño e Implementación de un Órgano Musical Electrónico con Theremin*. Tesis de grado, UNMSM, Perú, 2013.
- [7] E. Palacios, *Microcontrolador PIC16F84: Desarrollo de Proyectos*. Alfaomega, 2ª Edición, 2004.
- [8] J. M. Angulo, *Microcontroladores PIC: Diseño Práctico de Aplicaciones*. Mc Graw Hill, 3ª Edición, 2003.
- [9] J. R. Lajara, *Diseño de Circuitos Impresos con EAGLE*. 2014.
- [10] A. Glinesky, *Theremin: Ether Music and Espionage*. Urbana etc. : University of Illinois, 2005.
- [11] S. Martin, *Theremin: An Electronic Odyssey*. 1993.
- [12] H. Fjellestad, *Moog: A Documentary Film*. 2004.
- [13] T. Holmes, *Electronic and Experimental Music*. Routledge, 2ª Edición, 2002.
- [14] J. Axelson, *Making printed circuit boards*. 1993.
- [15] R. Prasad, *Surface Mount Technology: Principles and Practice*. 1997.
- [16] J. McKelvey & H. Grotch, *Física para Ciencias e Ingeniería, Tomo II*. 1ª Edición, 1981.
- [17] J. Millman & C. Halkias, *Electrónica Integrada*. McGraw-Hill, 1976.