

# Diseño e Implementación de un Órgano Musical Electrónico

Design and Implementation of an Electronic Musical Organ

*Víctor Enrique Dávila Briones<sup>1</sup>*

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

**Resumen**— Este trabajo presenta el diseño e implementación de un órgano musical electrónico digital capaz de generar distintos sonidos, para componer e interpretar música en tiempo real, de modo que pueda ser utilizado en un estudio de grabación así como en presentaciones en vivo. El diseño se ha orientado utilizando microcontroladores de 8 y de 16 bits, tanto para la etapa de control del instrumento como para la de síntesis de las notas musicales.

**Abstract**— This work presents the design and implementation of a digital musical organ which generates different sounds, in order to compose and perform real time music in a study or in live performances. The design has been focused on both 8 and 16 bit microcontrollers for controlling the instrument as well as for musical synthesis.

**Palabras clave**— Teclado musical, filtro digital IIR, microcontrolador digital de señales, síntesis sustractiva, síntesis directa.

**Key words**— Musical keyboard, IIR digital filter, digital signal microcontroller, subtractive synthesis, direct synthesis.

## I. INTRODUCCIÓN

El órgano es un tipo de instrumento musical que usa un teclado para su interpretación. El teclado es la parte o sección frontal que está provista de teclas adyacentes de color negro y blanco destinadas a ser accionadas por medio de los dedos de las manos como se observa en la Fig. 1. Al presionarse las teclas, el instrumento produce sonidos por medios acústicos, electrónicos o electromagnéticos según el caso, y dichos sonidos ejecutados a lo largo del tiempo generan melodías. El intervalo entre teclas adyacentes negras y blancas es de un semitono y entre dos teclas corresponde a un tono.

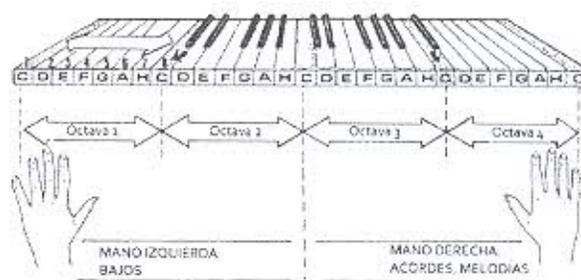


Fig. 1. Teclado del órgano musical y su distribución.

El instrumento musical a diseñar es un órgano musical monofónico [1], por lo tanto dispone de un teclado de plástico de 5 octavas de la escala cromática (12 notas por octava) para controlar eficazmente las notas musicales. Un órgano monofónico únicamente es capaz de tocar una nota a la vez (como los instrumentos de viento o algunos de cuerda como el violín), es decir tiene solamente un módulo de voz [2], y éste será el circuito donde los microcontroladores se encargarán de sintetizar las ondas sonoras que ejecutaremos como notas musicales.

Se dispondrá además de un panel de control compuesto por pulsadores y por un visualizador LCD. Para definir el timbre de las notas musicales sólo tenemos que presionar estos pulsadores y pasaremos inmediatamente de una forma de onda a otra en nuestra salida, el sistema está diseñado para proporcionar 6 timbres distintos. En el LCD se visualizará el tipo de filtro digital aplicado para obtener la correspondiente forma de onda. Finalmente, un amplificador de potencia de audio a la salida del dispositivo aumentará los niveles de la señal de audio para oír la música en un par de altavoces.

## II. METODOLOGÍA

El diagrama de bloques general en la Fig. 2 nos muestra cómo conseguiríamos construir el instrumento musical deseado. El usuario intérprete tiene contacto directo con los controles de

<sup>1</sup> Víctor Enrique Dávila Briones, e-mail: victor\_depeche@hotmail.com

funcionamiento y con el controlador musical (el teclado de plástico de 5 octavas). Estos dispositivos generan señales de voltaje que desembocan en la entrada de la etapa de procesamiento, la cual está conformada por los microcontroladores y que se encargarán de dos procesos: control del sistema y generación de la señal de audio (también llamada síntesis de la señal de audio).

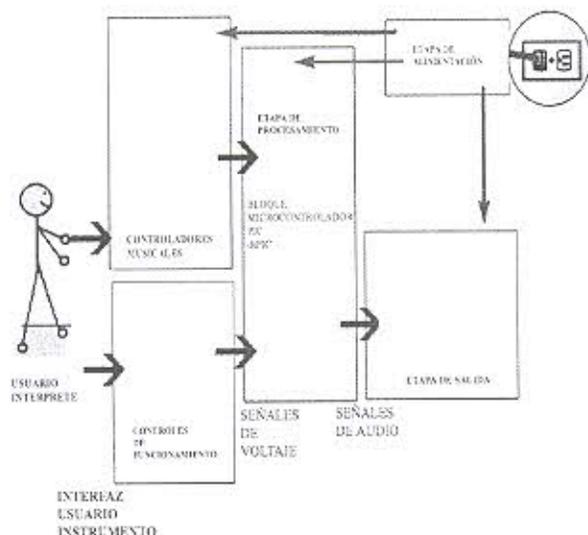


Fig. 2. Diagrama de bloques general del órgano musical.

Por último la señal de audio es amplificada mediante la etapa de salida: un amplificador de potencia de audio de clase AB o clase D. Obviamente es primordial diseñar una etapa de alimentación que proporcione la energía necesaria para el correcto funcionamiento de los dispositivos electrónicos, por lo que se diseñará una fuente lineal regulada AC-DC, de este modo el instrumento musical podrá energizarse desde cualquier toma de corriente alterna. En la Tabla I se indican las frecuencias con las que se va a trabajar en nuestro proyecto. Se utilizarán las octavas 1, 2, 3, 4, 5, hasta el *do* de la octava 6.

TABLA I. VALOR EN HERTZIOS DE LAS FRECUENCIAS DE LAS NOTAS MUSICALES

	Oc. 0	Oc. 1	Oc. 2	Oc. 3	Oc. 4	Oc. 5	Oc. 6	Oc. 7	Oc. 8
Do	32.70	65.41	130.81	261.63	523.25	1046.50	2093.00	4186.01	8372.02
Do#	34.65	69.30	138.59	277.18	554.37	1108.73	2217.46	4434.92	8869.84
Re	36.71	73.42	146.83	293.66	587.33	1174.66	2349.32	4698.64	9397.28
Re#	38.89	77.78	155.56	311.13	622.25	1244.51	2489.02	4978.04	9956.08
Mi	41.20	82.41	164.81	329.63	659.26	1318.51	2637.02	5274.04	10548.08
Fa	43.65	87.31	174.61	349.23	698.46	1396.91	2793.82	5587.64	11175.28
Fa#	46.25	92.50	185.00	369.99	739.99	1479.98	2959.96	5919.92	11839.84
Sol	49.00	98.00	196.00	392.00	783.99	1567.98	3135.96	6271.92	12543.84
Sol#	51.91	103.83	207.65	415.30	830.61	1661.22	3322.44	6644.88	13289.76
La	55.00	110.00	220.00	440.00	880.00	1760.00	3520.00	7040.00	14080.00
La#	58.27	116.54	233.08	466.16	932.33	1864.66	3729.33	7458.66	14917.32
Si	60.87	121.74	243.47	486.94	973.88	1947.77	3895.53	7791.07	15582.14

Es fundamental resaltar que todo instrumento musical electrónico debe presentar dos componentes principales: el sintetizador de voz que es la circuitería electrónica donde se generan las señales de audio que escucharemos, y el controlador musical [2] que es el dispositivo y circuitería asociada que nos permite acceder y manejar las notas musicales para la interpretación.

#### A. Controlador Musical

En la Fig. 3 se observa el teclado [3] utilizado en nuestro proyecto, el cual se obtuvo de un órgano electrónico comercial. Consiste simplemente de las teclas de plástico y una placa que contiene pulsadores de sensibilidad que van por debajo de cada tecla.

Se utilizó únicamente el teclado de plástico del órgano electrónico comercial y sus correspondientes pulsadores, mas nada de la circuitería electrónica proveniente de este producto comercial.

En la Fig. 4 se observa cómo se hizo el reconocimiento de cada uno de los pines de la matriz de pulsadores del teclado, para luego poder utilizar estos mismos pines en nuestro propio circuito.

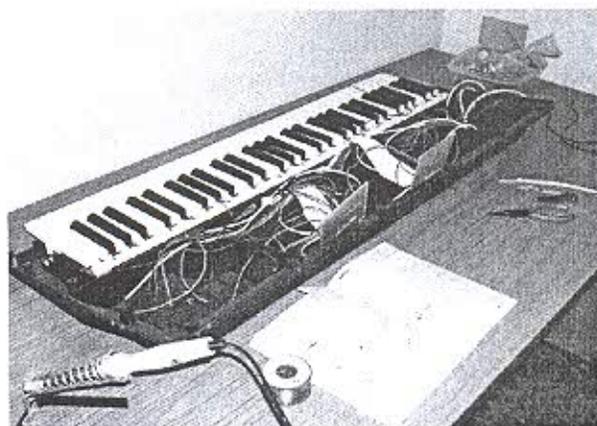


Fig. 3. Teclado de plástico utilizado en nuestro circuito.



Fig. 4. Identificando los pines correspondientes a las teclas.

### B. Sintetizador de Voz

El diagrama de bloques del sintetizador de voz de la Fig. 5 nos muestra las distintas formas de onda sintetizadas: una onda cuadrada originada mediante síntesis directa en el microcontrolador PIC16F877A [4], [5] y, mediante síntesis substractiva por medio del filtrado digital a esta misma onda cuadrada, otras cinco formas de onda más con lo que se obtienen en total seis timbres diferentes. Luego podemos dividir el circuito en dos bloques:

- 1) Circuito generador de onda cuadrada
- 2) Circuito de filtrado digital (para variar la forma de onda).

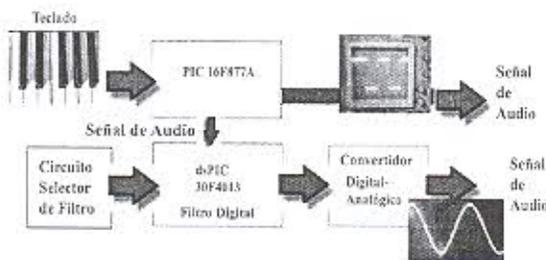


Fig. 5. Diagrama de bloques del sintetizador de voz.

#### 1. Circuito generador de onda cuadrada

La Fig. 6 nos muestra el esquema electrónico del Circuito Generador de Onda Cuadrada. Los grupos de interruptores representan las teclas del teclado de plástico (para un teclado de 5 octavas tendríamos 61 teclas). Estas 61 teclas están ordenadas en un arreglo de 8 filas x 16 columnas, de modo que sólo se utilizarán como entradas 24 pines del PIC16F877A, dentro del cual se encuentra un programa desarrollado en lenguaje C. Con este programa el PIC escanea las filas pasando un "1" lógico a través de ellas de manera secuencial, esperando que sea cerrado algún interruptor (es decir, se presione alguna tecla) lo cual hará que cambie el nivel lógico de alguna de las columnas (pasaría de 0 a 1 lógico); el PIC detecta esto y saca por el pin RE0 una onda cuadrada de frecuencia correspondiente a una de 61 posibles frecuencias musicales programadas en el PIC, según sea el valor numérico de la dualidad fila-columna.

La onda cuadrada de salida en el pin RE0 del PIC16F877A se conecta a la entrada del Amplificador de Potencia de Audio si se va a trabajar con señal normal, o a la entrada analógica del dsPIC30F4013 [6] si se va a trabajar con señal filtrada.

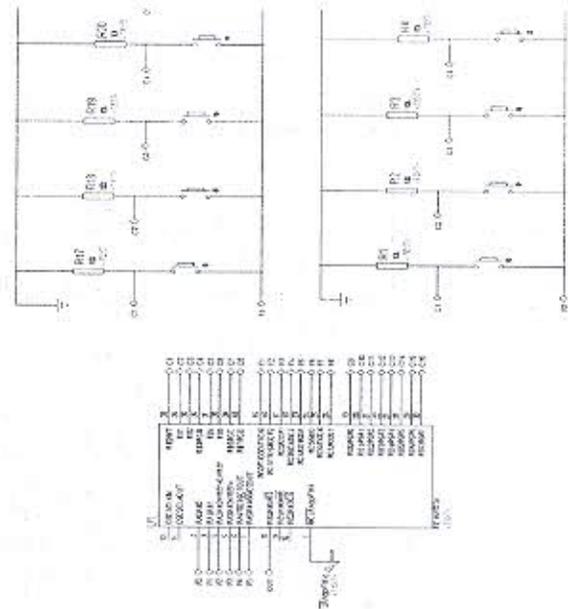


Fig. 6. Esquema del circuito generador de onda cuadrada.

#### 2. Circuito de filtrado digital

A partir de la onda cuadrada generada por el PIC se pueden obtener distintas formas de onda y distintos timbres musicales; es decir, aplicando síntesis substractiva mediante el filtrado digital de una señal rica en armónicos: la onda cuadrada posee una frecuencia fundamental más sus armónicos impares de amplitudes proporcionales a la fundamental [3] (ver la Fig. 7 y la Fig. 8).

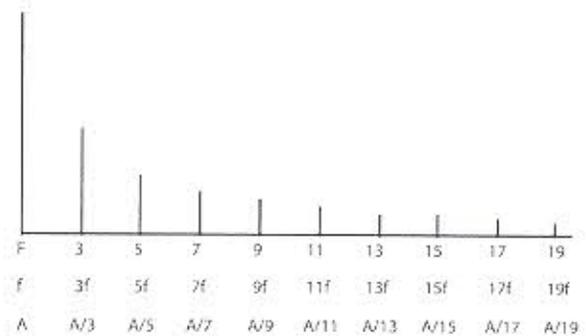


Fig. 7. Espectro armónico de una onda cuadrada.

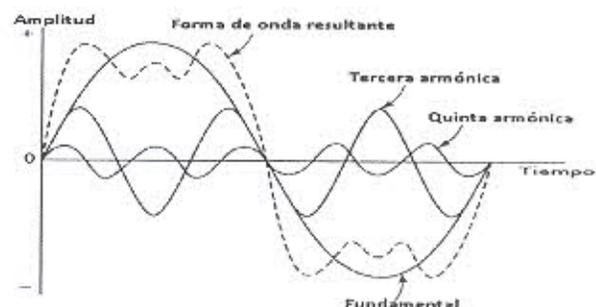


Fig. 8. Suma de armónicas impares en cantidades proporcionales para obtener la onda cuadrada.

Para conseguir esto se programa en el dsPIC30F4013 un conjunto de cinco filtros pasabajos digitales: Butterworth, Bessel, Chebyshev, Elíptico, e Inversa de Chebyshev, todos ellos con frecuencia de corte de 440 Hz. Aplicando estos filtros digitales IIR [7] lo que se consigue es variar el contenido armónico de la señal cuadrada lo cual repercute directamente en la forma de onda y por consiguiente en el timbre de la señal de audio. El funcionamiento del circuito es el siguiente: la señal de audio de salida del circuito generador de onda cuadrada es llevada a la entrada del dsPIC30F, específicamente al pin número 2: AN0, correspondiente a la entrada analógica del dispositivo. En esta entrada la señal cuadrada es muestreada y cada una de las muestras convertida a formato digital; para luego aplicar a éstas determinado tipo de filtro digital -según el código proveniente del Panel de Control, el cual es recibido en 3 pines del puerto F del dsPIC30F4013- en el instante en que acciono el pulsador conectado al pin 17 (INT0) del dsPIC30F4013 que se encargará de originar la interrupción [8] respectiva para cambiar el tipo de filtro digital IIR. Una vez que se ha procesado la muestra mediante el filtro digital, la señal digital filtrada es llevada al puerto de salida que va conectado al circuito convertidor digital analógico de donde se obtiene la señal analógica filtrada que se conecta a la entrada del amplificador de potencia de audio. Como se observa en la Fig. 9:

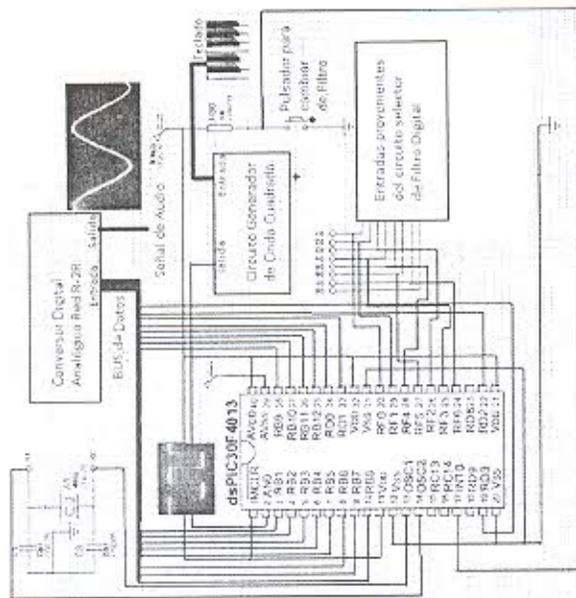


Fig. 9. Circuito esquemático del sintetizador de voz.

C. Convertidor Digital-Analógico

La Fig. 10 muestra el convertidor digital-analógico utilizado en nuestro circuito. Se intentó utilizar primero un chip CODEC [7] para audio,

pero no pudo conseguirse en el mercado nacional y el costo de importarlo resultaba excesivamente alto. Debido a estos inconvenientes, se optó por este económico circuito que para las condiciones presentadas respondió satisfactoriamente. Presentamos entonces en la Fig. 10 al Convertidor Digital-Analógico (o DAC por sus siglas en inglés) para el dsPIC30F4013, el cual consiste en una red escalera para 16 bits.

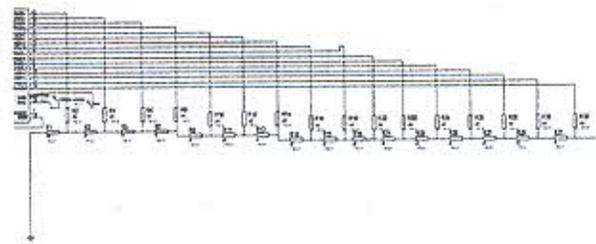


Fig. 10. Red escalera R-2R utilizada como DAC.

D. Circuito selector de filtro

Consiste de un circuito electrónico compuesto por varios pulsadores conectados a un microcontrolador PIC16F877A, el cual hará posible seleccionar el tipo de filtro digital que se aplicará a la señal cuadrada por medio de tres pines que salen hacia el dsPIC30F4013. De manera simultánea, en un LCD se visualiza el nombre del filtro digital aplicado. Como se observa en la Fig. 11:

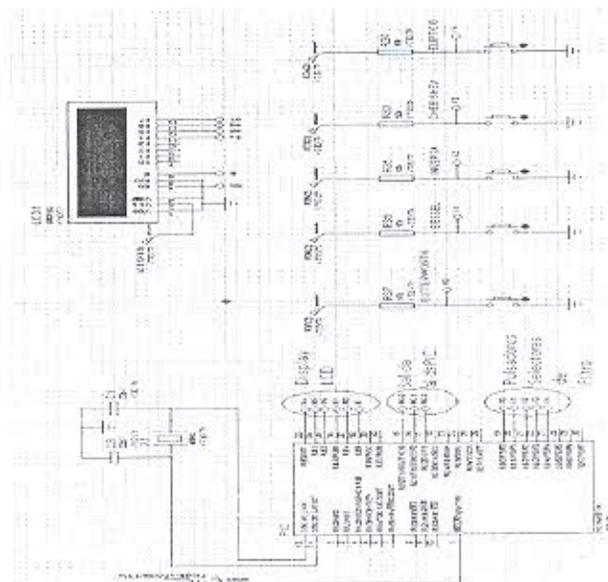


Fig. 11. Esquema del circuito selector de filtro.

E. Software para síntesis substractiva

El programa dsPIC Filter Design Lite [7], desarrollado por Momentum Data Systems Inc., es una versión DEMO de carácter introductorio y limitado que sirve para resolver filtros FIR e

IIR de escasa complejidad mediante un interfaz sencillo e intuitivo. Simplemente introduciendo las especificaciones del filtro que se desea realizar (Fig. 12), tanto filtros FIR como IIR: filtros pasabaja, pasaalta, pasabanda y banda eliminada (Fig. 13 y Fig. 14), se genera un fichero con los coeficientes del filtro (Fig. 15) y se puede importar este fichero para usarlo directamente en el MPLAB IDE [8]. De igual forma, la aplicación generará el código en ensamblador o en C para utilizar dicho filtro en nuestro programa para el dsPIC30F4013.

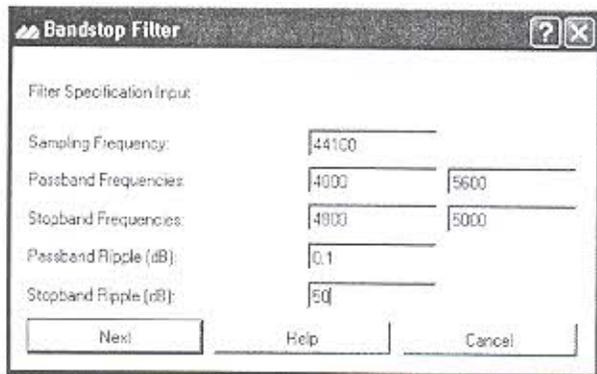


Fig. 12. Parámetros del filtro digital.



Fig. 13. Selección del tipo de filtro digital.

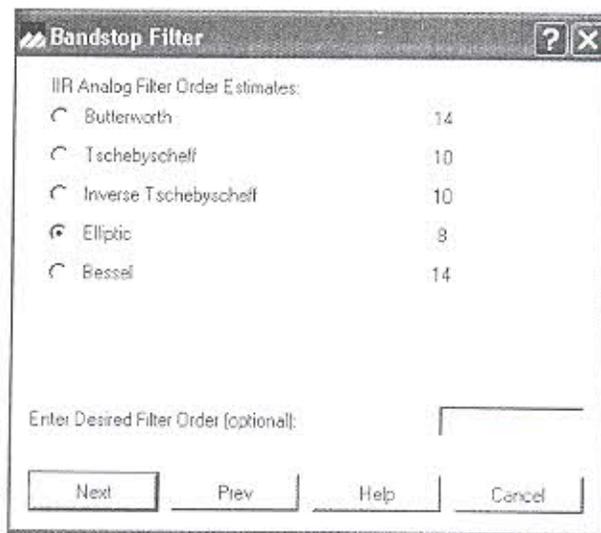


Fig. 14. Tipo de filtro IIR.



Fig. 15. Generación del fichero de coeficientes.

Todos los cálculos matemáticos complejos necesarios para realizar estas tareas se simplifican enormemente y, como se observa en la Fig. 16, se obtiene una serie de gráficos (magnitud, fase, respuesta ante impulso, respuesta ante escalón, polos y ceros, retraso, etcétera) que permitirán predecir el comportamiento de los filtros diseñados.

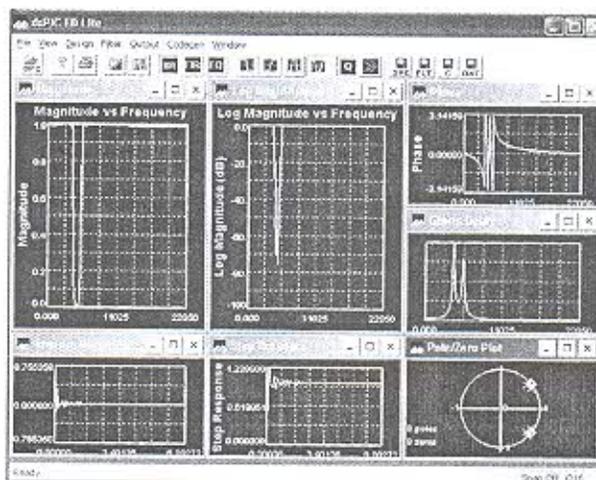


Fig. 16. Características del filtro IIR diseñado.

En la Fig. 17 se muestra el resultado de la simulación, con el software Proteus Isis, de nuestros filtros digitales implementados aplicándose sobre una señal de audio de forma de onda cuadrada (señal amarilla en la gráfica). La señal azul representa la señal de audio resultante luego de aplicar el filtro digital IIR pasabajos Butterworth.



Fig. 17. Forma de onda resultante al aplicar el filtro digital IIR Butterworth a una onda cuadrada.

En la Fig. 18 se muestra el resultado de la simulación, también con el Proteus, de nuestros filtros digitales implementados aplicándose otra vez sobre una señal de audio de forma de onda cuadrada (señal amarilla en la gráfica). Aquí la señal azul representa la señal de audio resultante luego de aplicar el filtro digital IIR pasabajos Elíptico.

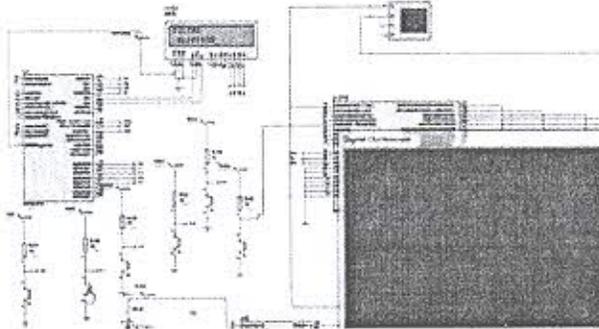


Fig. 18. Forma de onda resultante al aplicar el filtro digital IIR Elíptico a una onda cuadrada.

### III. RESULTADOS

En la Fig. 19 se muestra en funcionamiento el prototipo implementado para nuestro órgano musical electrónico, el cual como instrumento de teclado es capaz de entregar cinco octavas de notas musicales. El comportamiento del instrumento es más parecido al de un clave que al de un piano porque el nivel de intensidad sonora es siempre el mismo sin importar lo fuerte o rápido que se pulsen las teclas.



Fig. 19. Órgano musical electrónico implementado.

La señal de salida de audio puede presentar forma de onda cuadrada (sin filtrado) o cinco tipos distintos de forma de onda adicionales gracias al

filtrado digital de la señal cuadrada. Por ejemplo, para la onda cuadrada en las octavas altas del teclado el timbre del sonido obtenido es muy parecido al de una gaita escocesa; mientras que en las octavas bajas el timbre del sonido es dulce y apagado, como el sonido de un instrumento de viento de madera. El sistema ha respondido perfectamente en todos sus aspectos según lo planeado.

### IV. CONCLUSIONES

Se logró implementar y probar experimentalmente, con resultados satisfactorios, todas las etapas mostradas en los diagramas de bloques y circuitos esquemáticos. Se aplicó microcontroladores de 8 y 16 bits de bajo costo y consumo en el diseño e implementación de nuestro instrumento musical, tanto para la etapa de control del sistema como para la de síntesis de las notas musicales. Se estudió y aplicó el procesamiento digital de señales aplicado al audio; principalmente el diseño de filtros digitales IIR, lo que posibilitó la síntesis substractiva para la generación de las formas de onda de las notas musicales. Por otra parte, también se aplicó y demostró la síntesis directa en la generación del sonido. Con este trabajo se propone diseñar instrumentos musicales electrónicos con eficiencia y bajo coste, promoviendo así el desarrollo tecnológico en nuestro país.

### REFERENCIAS

- [1] Fjellestad, Hans. *Moog: A Documentary Film*. Disponible en DVD. 2004
- [2] Crombie, David. *The Complete Synthesizer: A comprehensive guide*. 1984
- [3] Jenkins, Mark. *Analog Synthesizers*. Focal Press. First Edition. 2007
- [4] PIC 16F877A Datasheet. [www.microchip.com](http://www.microchip.com)
- [5] Angulo Usategui, J. M. *Microcontroladores PIC. Diseño práctico de aplicaciones. Segunda parte*. Mc Graw Hill. 2ª Edición. 2000
- [6] dsPIC 30F4013 Datasheet. [www.microchip.com](http://www.microchip.com)
- [7] Angulo Usategui, J. M. *Microcontroladores Avanzados dsPIC: Controladores Digitales de Señales*. Thomson. 1ª Edición. 2006
- [8] Angulo Usategui, J. M. *Diseño práctico de aplicaciones dsPIC*. Mc Graw Hill. 1ª Edición. 2006