

**USO DE COMPONENTES DE BAJO COSTO PARA EL DISEÑO E  
IMPLEMENTACIÓN DE UN CIRCUITO IMPRESO EN EL PROCESAMIENTO  
DIGITAL DE SEÑALES DE AUDIO**

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A PRINTED CIRCUIT BOARD FOR  
DIGITAL AUDIO SIGNAL PROCESSING USING LOW COST COMPONENT**

Sherlin E. Hernández Contreras.<sup>1</sup>

Carlos A. Vides Herrera.<sup>2</sup>

Aldo Pardo García<sup>3</sup>

**Resumen**

En este trabajo se propone el diseño e implementación de un circuito impreso que permita la implementación de algoritmos de procesamiento digital de señales de audio en un sistema embebido de forma económica. Se estudiaron las posibilidades de desarrollar prototipos de bajo costo y fácil implementación, los dispositivos conocidos como dsPIC® se mostraron muy convenientes para este propósito y por eso han sido seleccionados para realizar las labores de procesamiento de señales. Para el diseño del circuito se ha examinado la actualidad de este tipo de productos, principalmente de la empresa Microchip, y se establecieron factores que permiten mejoras en los mismos. Con base en un esquema general propuesto y sumado a criterios de velocidad de procesamiento, consumo de energía, precio y posibilidades de desarrollo, se construyó un prototipo con resultados satisfactorios.

**Palabras clave:** Sistemas embebidos, DSP, dsPIC®, señales de audio, procesamiento digital de señales de audio

**Abstract**

In this paper it is proposed the design and implementation of a printed circuit board that allows the implementation of algorithms for digital audio signal processing in an economically embedded system. The possibilities of developing low cost and easy implementation prototypes

Fecha de recepción: Febrero de 2019 / Fecha de aceptación en forma revisada: Mayo 2019

---

<sup>1</sup> Ingeniero electrónico. Docente investigador del programa de Ingeniería Electrónica. Universidad de Pamplona. Email: [sherlin.hernandez@unipamplona.edu.co](mailto:sherlin.hernandez@unipamplona.edu.co), <https://orcid.org/0000-0001-7578-1321>

<sup>2</sup> Magister en Controles Industriales. Docente investigador del programa de Ingeniería Electrónica. Universidad de Pamplona. Email: [carlosarturvi@unipamplona.edu.co](mailto:carlosarturvi@unipamplona.edu.co), <https://orcid.org/0000-0001-8708-5470>

<sup>3</sup> PostPhd en Ingeniería eléctrica. Vicerrector de Investigaciones de la Universidad de Pamplona. Email: [apardo13@unipamplona.edu.co](mailto:apardo13@unipamplona.edu.co), <https://orcid.org/0000-0003-2040-9420>

were studied, the devices known as dsPIC® were shown very convenient for this purpose and for that reason they have been selected to realize the signal processing tasks. In order to design the board, it has been examined the current of this type of products, mainly by the company Microchip, and it has been established factors that allow the improvements in them. Based on a proposed general scheme and adding criteria of processing speed, energy consumption, price and development possibilities, a prototype was built with satisfactory results.

**Keywords:** Embedded systems, DSP, dsPIC®, audio signals, digital audio signal processing.

### Introducción

La importancia de las señales de audio y el auge de la tecnología digital evidencian un nuevo campo de exploración que supone la necesidad de contar con equipos y herramientas actualizados para su estudio e investigación (Barrero et al., 2005). En el mercado existen ya algunas tarjetas para procesamiento digital de señales de audio que, por sus características, tienen aún algunos aspectos por mejorar y no han sido del todo bien aceptadas como herramientas de iniciación para aquellos que quieren involucrarse en esta rama de la ingeniería.



Fig. 1. Esquema

general de un sistema DSP (Angulo et al., 2006)

En la Fig. 1 se observa el esquema general de un sistema de procesamiento digital de señales (DSP), los bloques básicos consisten en un convertidor analógico a digital (ADC), un procesador de señales (DSP) y un convertidor digital a analógico (DAC).

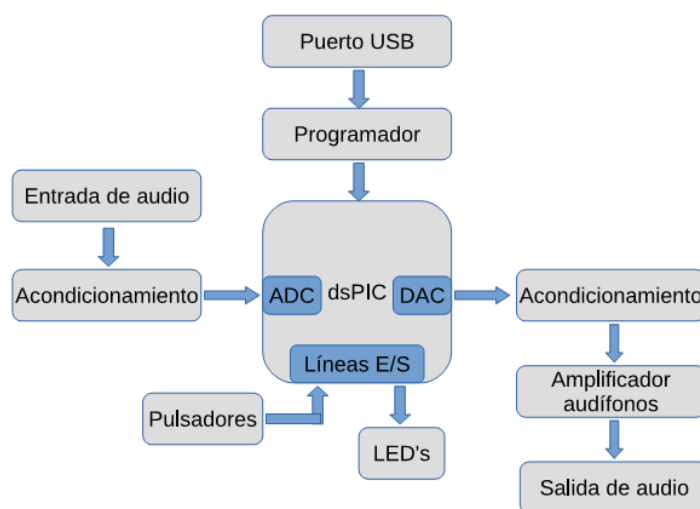
El presente artículo deriva del trabajo de grado de (Hernández, 2016), comienza con un diseño general de los bloques funcionales, luego se procede a examinar cada uno de estos bloques para seleccionar los componentes electrónicos que lo integran. Por último se muestran los resultados con la lista de materiales, una fotografía del prototipo final y la respuesta en frecuencia de un filtro implementado para comprobar el funcionamiento del circuito.

### Diseño general de los bloques funcionales

Teniendo en cuenta que un problema general de las tarjetas embebidas para procesamiento de audio es que tienen un costo elevado, se ha decidido hacer un enfoque en materiales económicos sin afectar significativamente sus características. Para lograr esto se han seguido los siguientes lineamientos, los cuales permitirán reducir los costos del prototipo:

- Tarjeta totalmente integrada para reducir al máximo el uso de herramientas adicionales; esto implica que el circuito de programación debe estar contenido en el prototipo final.
- Herramientas de desarrollo bien asequibles y actualizadas, preferiblemente software libre.
- No se tendrán en cuenta herramientas de depuración in circuit, tales como JTAG.
- Se tratará de reducir al mínimo la cantidad de componentes y se dará prioridad a los circuitos integrados más autosuficientes.

Con estos lineamientos, se postula a la familia de dispositivos conocida como dsPIC®, de la empresa Microchip, como principal componente que reduce los costos del prototipo ya que cuenta con algunos ejemplares que incluyen ADC y DAC, lo cual reduce enormemente los costos de implementación del sistema embebido, esto sumado a que estos dispositivos son de fácil consecución en el mercado (Angulo et al., 2006). También se propone que la alimentación eléctrica derive de un puerto USB para aprovechar como alimentación al mismo puerto de programación.



*Fig. 2. Esquema general propuesto*

Las entradas y salidas de audio deben tener su respectivo acondicionamiento y se necesitará un pequeño amplificador para audífonos, además de las líneas dedicadas a la señal de audio también se dispondrán de unas líneas para entrada de señal digital (pulsadores) y salida de indicadores (LED). Con estas consideraciones, el sistema general queda como en la Fig. 2.

### Selección de los componentes

Los principales parámetros de los ADC y DAC son: resolución, rango dinámico, frecuencia de muestreo, voltaje de operación, formato de los datos, tipo de comunicación. Los principales parámetros del DSP son: velocidad de procesamiento (medida en MIPS), voltaje de operación, integración del sistema, ancho de los datos, memoria de datos y memoria de programa (Salazar, en línea).

#### *Procesador digital de señales*

Debido a que el procesador de señales a utilizar es un dsPIC®, se hace un análisis del mismo: conocido también como DSC (Controlador Digital de Señales) es un dispositivo capaz de realizar operaciones propias del procesamiento de señales en un solo ciclo de máquina, con arquitectura de punto fijo de 16 bits. Existen tres grandes familias de DSC: Familia dsPIC30F, Familia dsPIC33F, Familia dsPIC33E.

La arquitectura de estas familias se ajusta a la resolución tradicional de sonido monofónico que tradicionalmente ha sido de 16 bits. En la Tabla 1 se muestran las características más relevantes de estas dos familias.

*Tabla 1: Características principales de las familias de dsPIC®:*

<b>Recurso</b>	<b>dsPIC 30F</b>	<b>dsPIC 33F</b>	<b>dsPIC 33E</b>
<b>Voltaje de alimentación</b>	5 v	3.3 v	3.3 v
<b>Velocidad de procesamiento</b>	Hasta 30 MIPS	Hasta 40 MIPS	Hasta 70 MIPS
<b>Memoria de programa</b>	Hasta 144 KB	Hasta 256 KB	Hasta 512 KB
<b>Memoria RAM (Bytes)</b>	Hasta 8192	Hasta 30720	Hasta 53248
<b>Número de pines</b>	De 18 a 80	De 18 a 100	De 28 a 144
<b>Mapeo de pines</b>	No	Sí*	Sí
<b>ADC</b>	12 bit, 200 ksps	12 bit, 500 ksps	12 bit, 500 ksps
<b>DAC</b>	No	Sí*	Sí*
<b>Interfaz CODEC</b>	Sí*	Sí*	Sí*

\* Algunos dispositivos pueden carecer de esta característica.

La familia DSPIC30F no sólo brinda menos capacidades sino también un mayor consumo de potencia debido a que opera con un voltaje mayor. La familia DSPIC33E es la más nueva pero el desarrollo de aplicaciones con estos dispositivos requiere de herramientas más caras. Por tal motivo, la familia dsPIC33F se muestra más favorable para la construcción del prototipo y específicamente el dispositivo dsPIC33FJ128GP802, ya que es muy versátil, económico, incorpora ADC y DAC, altamente comercial y es de fácil implementación. Sus principales características están resumidas en la Tabla 2.

*Tabla 2: Principales características del dsPIC33FJ128GP802*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Ancho de datos</b>	16 bits
<b>Velocidad de procesamiento</b>	40 MIPS
<b>Memoria de programa</b>	128 KB
<b>Memoria RAM</b>	16284 Bytes
<b>Voltaje de operación</b>	3 v ~ 3.6 v
<b>Pines E/S</b>	21
<b>ADC</b>	12 bit, 500 ksps
<b>DAC</b>	16 bit, 100 ksps
<b>Pines remapeables</b>	16
<b>Cantidad de instrucciones</b>	83

### *Circuito de programación*

Incorporado es un clon del conocido programador pickit2, y los componentes son los mínimos requeridos para su funcionamiento. El inductor usado para el circuito elevador de voltaje es de 680 uH, bastante comercial.

### *Circuitos de acondicionamiento*

El acondicionamiento de la señal tiene dos bloques separados: el de entrada de audio y el de salida de audio. Para el primero se ha empleado un amplificador operacional en modo inversor con un divisor de tensión que ubica la referencia en el punto medio, de esta manera tanto los ciclos positivos como negativos de la señal quedan acoplados a la entrada del ADC, por motivos prácticos no se incluyó filtro antialiasing.

El otro bloque consiste en un amplificador sumador que se encarga de mezclar la señal de dos líneas balanceadas provenientes del DAC. La señal de referencia también se logra con

un divisor de voltaje para obtener el punto medio de la señal, luego de esto la señal va conectada a un amplificador de audio LM386, debido a que este amplificador tiene una ganancia implícita de 20, la entrada ha sido atenuada en igual magnitud mediante un divisor de voltaje con el objetivo de obtener una ganancia neta unitaria y así poder usar audífonos con un volumen apropiado.

### ***Circuito de alimentación***

Para este circuito han sido considerados los reguladores lineales debido a que son más inmunes al ruido. La alimentación que entra al circuito es de 5 voltios ya que proviene del puerto USB, pero es necesario reducirla a 3.3 voltios debido a que este es el voltaje de operación del DSC. Después del voltaje nominal de salida, la caída de tensión (dropout voltage) del regulador es el principal parámetro a tener en cuenta, en este caso sería una caída en el regulador de 1.7 voltios.

El regulador elegido ha sido el LD1117 en su versión de 3.3 voltios, debido a su simplicidad de uso y economía. El modo de conexión ha sido tomado directamente de la hoja de datos del fabricante.

### ***Interfaz con el usuario***

El usuario final podrá interactuar con el prototipo mediante un pulsador de reset, dos pulsadores de propósito general y 2 LED indicadores de propósito general. Además, cuenta con regletas tipo hembra que permiten conectar 8 líneas de entrada/salida del DSC con componentes externos a la tarjeta.

### ***Listado de materiales***

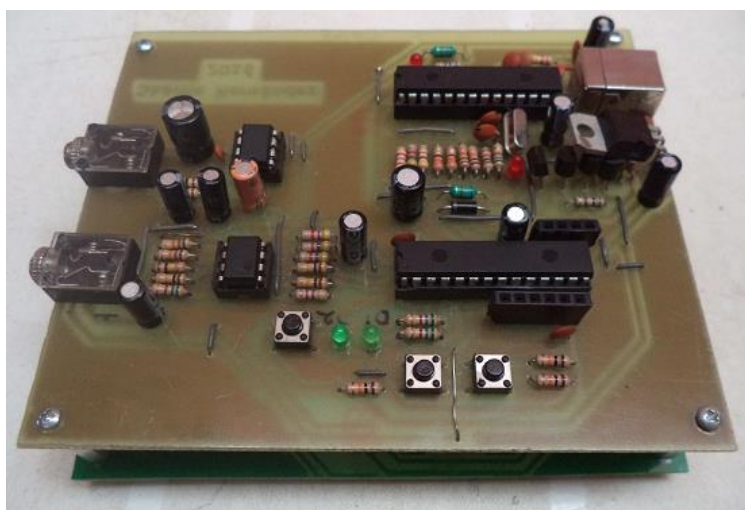
En la Tabla 3 se resumen los materiales utilizados, no se tuvo en cuenta los detalles relacionados a la base de soporte utilizada en el prototipo final.

*Tabla 3: Listado de materiales utilizados*

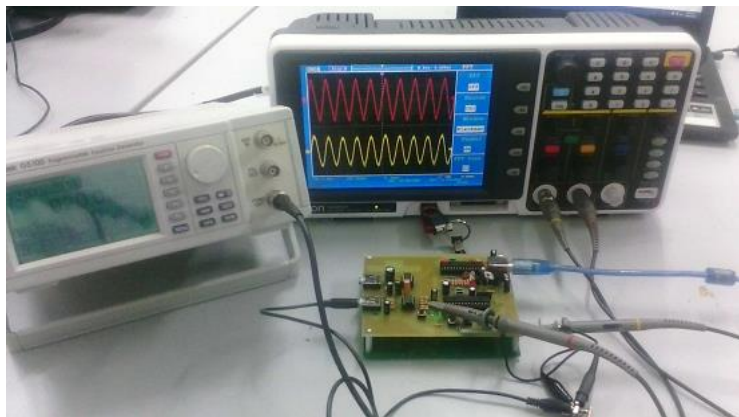
<b>Cant.</b>	<b>Item</b>
1	PCB una cara 121.9 m x 97.2 mm
20	Puentes de alambre
37	Resistores
24	Capacitores

3	Inductores
4	Diodos LED
4	Transistores
3	Interruptores tipo pulsador
1	Regulador LD1117
1	dsPIC33FJ128GP802
1	PIC18F2550
1	Amp. operacional LM358
1	Amplificador de audio LM386
1	Conector USB tipo B
2	Conectores Jack de 3.5 mm
1	Regleta hembra de 6 pines
1	Regleta hembra de 4 pines

Circuito impreso. En la Fig. 3 se muestra una fotografía relativa al prototipo final. Consiste en una placa de circuito impreso de una cara, con tecnología Through-Hole, de fácil implementación y con componentes de bajo costo, el diseño ha sido realizado en el software kiCAD de manera que exista una separación entre tierra analógica y tierra digital para aumentar la inmunidad al ruido. El diseño en general ha seguido las recomendaciones de (Baker, 2005).



*Fig 3. Fotografía del prototipo final*



*Fig 4. Montaje empleado para probar el circuito*

Para probar el circuito se implementó un filtro FIR pasa bajas con coeficientes calculados mediante el software dsPICfdLite, las características del filtro se muestran en la Tabla 4. Posteriormente se programó el filtro mediante el Entorno de Desarrollo Integrado MPLAB X en su versión 3.30.

*Tabla 4: Detalles del filtro implementado*

<b>Especificación</b>	<b>Valor</b>
Frecuencia de muestreo	44229
Banda de paso	(0,1000) Hz
Banda de transición	(1000,2000) Hz
Banda de rechazo	(2000,22114.5) Hz
Rizado de la banda de paso	1 dB
Rizado de la banda de rechazo	20 dB

Para validar el funcionamiento, se ha utilizado el montaje mostrado en la Fig. 4. Mediante un generador de señales Protek G5100 se aplicaron ondas senoidales con frecuencias comprendidas entre 20 Hz y 20 kHz. Las señales fueron medidas con los dos canales de un osciloscopio OWON MSO8202T, un canal fue conectado al pin DAC1RP del DSC para medir la señal, el otro canal del osciloscopio fue utilizado para monitorear la entrada de señal en el pin de entrada de la señal analógica del DSC.

Las mediciones se tabularon y graficaron en Excel en escala logarítmica, el resultado se muestra en la Fig. 5 y se puede apreciar un comportamiento acorde a lo esperado.

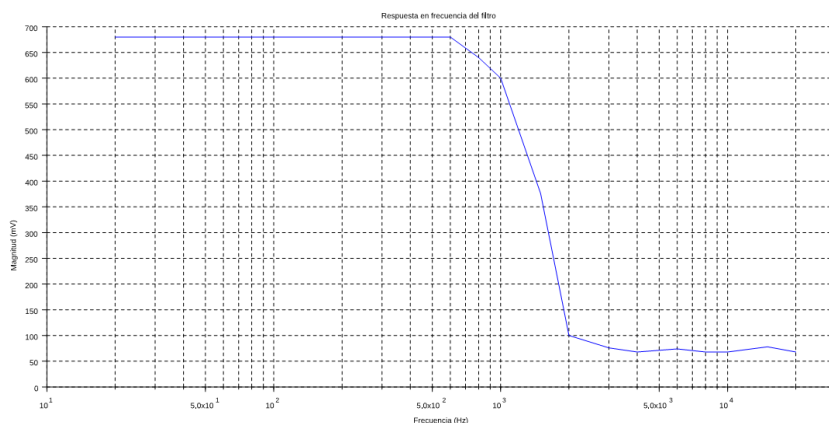


Fig. 5. Gráfica de la tabulación de mediciones

### Análisis económico

En la Tabla 5 se condensa la información económica de varias tarjetas de procesamiento digital de audio incluyendo la aquí propuesta. No se tuvo en cuenta costos adicionales como impuestos o gastos de envío.

Tabla 5: Precios estimados de algunas tarjetas de procesamiento digital de audio – año 2017

Producto	Precio estimado USD
EasyPIC Fusion™ v7	\$ 179.00
Mikromedia for dsPIC33	\$99.00
dsPICDEM™ 1.1 Plus (Obsoleto)	\$299.99
MPLAB starter kit for dsPIC DSCs	\$59.98
Audio Development Board for dsPIC33E	\$149.99
Tarjeta propuesta (sin costos de manufactura)	\$20.46

### Conclusiones

El dispositivo DSPIC33FJ128GP802 se puede utilizar para procesamiento digital de audio con capacidad de operar sobre la banda de audio (20 Hz a 20 kHz) utilizando su ADC y DAC internos, lo cual permite el desarrollo de prototipos de bajo costo y fácil construcción aumentando las probabilidades de llevar un producto final a mayor cantidad de personas y fomentar el aprendizaje de esta tecnología.

En el circuito implementado, se estableció que la ganancia neta del amplificador de audio LM386 debe ser igual o menor a 1, con el fin de adaptarlo como amplificador de audífonos con niveles de volumen adecuados para el oído humano. La ganancia implícita de dicho

amplificador es de 20, y el problema fue resuelto con un divisor de voltaje que disminuyera por lo menos 20 veces la señal de audio obtenida del DAC.

Aunque hay muchas personas o pequeñas empresas con proyectos independientes, el mercado de tarjetas de desarrollo para procesamiento digital de audio está dominado principalmente por dos empresas: Mikroelektronika y Microchip.

La implementación de filtros mostró una gran precisión en la respuesta, con lo cual el circuito desarrollado podría tener un alto grado de aceptación entre personas interesadas en el desarrollo de aplicaciones con esta tecnología.

### Referencias bibliográficas

- Alvarado M., J. P. (2011). *Procesamiento Digital de Señales*. Notas de clase, Cartago, Costa Rica.
- Angulo U., J. M. y García Z., B. y Angulo M., I. y Sáez, J. V. (2006). *Microcontroladores avanzados dsPIC: Controladores Digitales de Señal. Arquitectura, programación y aplicaciones*. Madrid: Thomson-Paraninfo.
- Angulo U., J. M. y Etxebarria R., A. y Angulo M., I. y Trueba P., I. (2006) *dsPIC Diseño Práctico de Aplicaciones*. McGraw-Hill Interamericana de España.
- Baker, B. (2005) *A Baker's Dozen: Real analog solutions for digital designers*. Elsevier.
- Baker, B. C. (1999) Operational Amplifier Topologies and DC Specifications. En: AN722, *Microchip Technology Inc., DS00722*
- Baker, B. C. (2000). Operational Amplifier AC Specifications and Applications. En: AN723, *Microchip Technology Inc., DS00723*.
- Baker, B. C. (2000) Using Operational Amplifiers for Analog Gain in Embedded System Design. En: AN682, *Microchip Technology Inc.*
- Barrero G., F. J. y Toral M., S. L. y Ruiz G., M. (2005) *Procesadores Digitales de Señal de altas prestaciones de Texas Instruments TM: De la familia TMS320C3x a la TMS320C6000*. Madrid: McGraw-Hill-Interamericana de España.
- Bermeo, W., de Souza, A., Fernández, T., Honórico, D., Nogueira dos Reis, L. y Barreto, L. (2017). Control modo deslizante aplicado en la malla de corriente para una aplicación de una base-DSP para el control de posición de un motor de inducción de jaula de ardilla. *Revista Tecnologías de Avanzada*, ISSN: 1692-7257
- Curtis, K. (2002). Analog Design in a Digital World Using Mixed Signal Controllers. En: AN823, *Microchip Technology Inc., DS00823A*.

- e2v. (2009): Design Considerations for Mixed-Signal: How to Design a PCB Layout. En: *AN, e2v semiconductors SAS, 0999A-BDC-07/09*.
- Hernández C., S. E. (2016). *Desarrollo de un sistema embebido para prácticas de procesamiento digital de audio utilizando dsPIC®*. Trabajo de grado, Universidad de Pamplona, Colombia.
- Microchip Inc. *dsPIC33F/PIC24H Family Reference Manual*. DS70211B.
- Microchip Inc. (2012). *16-bit Digital Signal Controllers (up to 128 KB Flash and 16K SRAM) with Advanced Analog*. Datasheet, DS70292G.
- Microelectronics, ST. *LD1117 series: Low drop fixed and adjustable positive voltage regulators*. Datasheet.
- MikroElektronika* <https://www.mikroe.com>
- Pardo García A, Castellanos González L. (2017). Automatización de Ambientes en Invernaderos Simulando Escenarios Futuros, *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, ISSN: 1692-7257. Volumen1–Número 29-2017.
- Pérez, J, & Castro, J (2018). LRS1: un robot social de bajo costo para la asignatura “Programación 1”. *Revista Tecnologías de Avanzada*, ISSN: 1692-7257
- Salazar, J. *Procesadores digitales de señal (DSP): Arquitectura y criterios de selección*. [http://arantxa.ii.uam.es/~taao1/teoria/tema1/pdf/Procesadores\\_dig.pdf](http://arantxa.ii.uam.es/~taao1/teoria/tema1/pdf/Procesadores_dig.pdf) (1 de abril de 2017)
- Suarez O, Vega C, Sánchez E, González A, Rodríguez Jorge, Pardo García A. (2018). Degradación anormal de p53 e inducción de apoptosis en la red p53-mdm2 usando la estrategia de control tipo pin. *Revista Tecnologías de Avanzada*, ISSN: 1692-7257
- Zator Systems. *Tratamiento digital del sonido*. [http://www.zator.com/Hardware/H10\\_2.htm](http://www.zator.com/Hardware/H10_2.htm). (6 junio de 2016)