

## Curso Teórico-Práctico en Procesamiento Digital de Señales, enfocado al audio

*Luis MARTÍNEZ-FERRÍN, Alejandro ROSSO-PÉREZ*

*Universidad Pontificia Bolivariana, Cir. 1 #70-01, B11, Medellín, Colombia.  
luiseduardo.martinez@alfa.upb.edu.co*

Resumen: Este artículo muestra los objetivos y resultados obtenidos en el trabajo de grado: Curso Teórico-Práctico en Procesamiento Digital de Señales, enfocado al audio. También se revisan los problemas encontrados durante su desarrollo, así como las soluciones que permitieron la conclusión y elaboración del curso. *Copyright © UPB 2015*

Palabras clave: DSP, procesamiento de señales, audio, programación, sistemas de tiempo discreto.

Abstract: This article aims to show the objectives and results obtained within the development of the project: Theoretical-Practical Course on Digital Signal Processing, with an emphasis on audio applications. The article also reviews the problems found throughout the process, as well as the solutions that allowed the conclusion and elaboration of the course.

Keywords: DSP, signal processing, audio, programming, discrete time systems.

UPB\_autoArt 2014-09-13, s 2015-02-25

## 1. INTRODUCCIÓN

El procesamiento digital de señales es una técnica de manipulación matemática de la información usada para modificar, extraer o sintetizar las características importantes de una señal mediante el uso de hardware y software. En la actualidad, los diferentes avances tecnológicos han llevado a la implementación masiva de estas técnicas en diversos campos y aplicaciones como radares y GPS para navegación, celulares inteligentes, reproductores multimedia, cámaras digitales, televisores, etc. Y en el audio digital para: grabación, producción, síntesis, mezcla, creación de efectos de sonido, análisis de ondas de audio, entre otras.

En el ámbito académico se dictan alrededor del mundo diversos cursos sobre el tema, los cuales utilizan como parte del aprendizaje módulos de desarrollo de DSP y software matemáticos como Matlab®. Algunas de las universidades que incluyen estos cursos en su plan de estudio son: Universidad de Oxford, Universidad de Cambridge, Universidad de Stanford, Colegio de Ingeniería de Miami, Universidad de Griffith, Universidad de Sydney y Universidad de Birmingham. También se destacan un gran número de grupos de investigación en estas academias, que estudian las aplicaciones del procesamiento digital en el audio, el aprendizaje de máquina, la meteorología, el reconocimiento de imágenes, video y voz.

Debido a esto, en este proyecto de grado se estudian los diferentes aspectos teóricos que influyen en la construcción de un

curso teórico-práctico en procesamiento digital de señales enfocado al audio que pueda ser tomado como parte de la Bolsa de Optativas desde diferentes programas de pregrado de la Escuela de Ingenierías de la Universidad Pontificia Bolivariana, y que además esté incluido en el portafolio de Formación Continua de esta.

En la sección 2 se hace una revisión de los elementos que componen el curso y en la sección 3 se muestran las consideraciones y elementos adicionales que se deben tener en cuenta en la construcción del mismo. Finalmente en las secciones 4 y 5 se revisa el potencial y se muestran las conclusiones del trabajo de grado, respectivamente.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL CURSO

El objetivo del trabajo de grado consiste en la investigación de los elementos necesarios que permitan la creación de una materia teórico-práctica en procesamiento digital de señales, enfocada al audio. Esto implica: la búsqueda de los contenidos y temáticas a ser enseñados sobre esta área (DSP), los conceptos previos requeridos para el entendimiento del curso y finalmente, el desarrollo de las prácticas que permitan al estudiante interiorizar dichos elementos. Con esto se busca que la tesis de grado pueda servir como un material bibliográfico que defina el currículo de la materia.

### 2.1. Hardware y software adquiridos

Para el desarrollo de las prácticas se ha elegido el kit de desarrollo de Texas Instruments C5535 eZdsp™. Dicho módulo (Figura 1) cuenta con las capacidades suficientes para realizar las actividades del curso. Además está respaldado por foros activos, librerías y una muy buena documentación dispuesta abiertamente por el fabricante (Texas Instruments Incorporated, 2011).



Figura 1. Módulo de desarrollo seleccionado

Este kit de desarrollo de Texas Instruments cuenta con el DSP TMS320C5535 de punto fijo de 16 bits, con capacidad de 320KB

de RAM, 2 unidades MAC y una velocidad de procesamiento de hasta 240 MIPS. En la tarjeta se encuentran además:

- Un códec de audio estéreo AIC3204 de 16 bits y con una frecuencia de muestreo de hasta 192KHz, conectado a dos *jacks* estéreos de salida y de entrada
- Una memoria flash SPI de 8MB
- Un conector para micro SD
- Emulador JTAG para USB, XDS100
- 5 leds de diferentes colores
- Un *display* OLED de 96\*16 pixeles
- Dos pulsadores
- Capacidad de expansión para interfaz inalámbrica
- Periféricos de entrada y salida: I<sup>2</sup>C, I<sup>2</sup>S, SPI, UART

Aparte de esto, el kit C5535 eZdsp™ viene con el software de desarrollo Code Composer Studio (CCS) de Texas Instruments, basado en Eclipse, el cual tiene capacidad para soportar los lenguajes: C, C++ y *assembly* (Texas Instruments Incorporated, 2011). Aunque el desarrollo del curso se basará únicamente en el lenguaje de programación C (Texas Instruments Incorporated, 2001).

El CCS puede ser descargado gratuitamente (en su más reciente versión) de la página de [Texas Instruments](http://www.ti.com).

## 2.2. Bases teóricas

Para poder enseñar los temas sobre procesamiento digital de señales es necesario revisar previamente con los estudiantes ciertos conceptos básicos sobre sistemas y señales de tiempo discreto y sobre el lenguaje de programación C (Embree, 1995). En la Tabla 1 se muestran los contenidos que deben ser revisados en las bases teóricas.

## 2.3. Contenidos del curso

La investigación llevada a cabo durante la realización de este trabajo de grado permitió la selección de las siguientes prácticas y conceptos que conforman el núcleo de un curso en procesamiento digital de señales. Se sugiere que estos temas sean enseñados en el orden en que aparecen en las siguientes líneas de esta sección.

*Familiarización.* Esta práctica sirve como introducción al reconocimiento y manejo de las herramientas de trabajo.

Con esta se busca que los estudiantes puedan:

- Conocer las herramientas básicas del entorno de desarrollo CCS
- Escribir un programa que permita visualizar una señal senoidal usando la herramienta graficadora del mismo
- Implementar las operaciones aritméticas básicas en formato Q15

Tabla 1. Conceptos previos del curso

Bases teóricas	Temas abordados
Sistemas y señales de tiempo discreto	Señales básicas
	Teorema del muestreo
	Cuantización
	Codificación
	Ecuaciones en diferencias
	Funciones de transferencia
	Variables de estado
	Diagramas de bloques
	Transformada discreta de Fourier
	Transformada rápida de Fourier
Lenguaje C	Convolución
	Palabras reservadas
	Tipos de dato
	<i>Casting</i>
	Estructuras
	Punteros
	Arreglos
	Control de flujo de programa
Memoria dinámica	
Directivas del compilador	

Y los siguientes conceptos previos son necesarios para el desarrollo de esta práctica:

- Operaciones en formato Q15
- Manejo del depurador del CCS
- Uso de *breakpoints*
- Manejo de la herramienta graficadora del CCS

*Síntesis de señales básicas.* En procesamiento de señales existen diversos métodos que permiten sintetizar sonidos. Sin embargo, en esta práctica se abordan únicamente la síntesis aditiva y la síntesis por *wavetable* (mediante el uso de LUT), ya que al ser las más fáciles de implementar y comprender, permiten una mejor enseñanza de los conceptos del curso.

Con esta práctica se busca que los estudiantes puedan:

- Generar las señales básicas (senoidal, triangular, cuadrada y diente de sierra) mediante síntesis aditiva usando la librería matemática de C: “math.h”
- Sintetizar las señales básicas mediante el uso de *Lookup Tables* (LUT)
- Reconocer los efectos del *aliasing*
- Comparar los tiempos de ejecución de cada tipo de síntesis

Y los siguientes conceptos previos son necesarios para el desarrollo de esta práctica:

- *Lookup tables*

- Técnicas de interpolación

*Transformada discreta de Fourier.* La transformada de Fourier es una de las herramientas más poderosas creadas en el procesamiento de señales. Este algoritmo matemático permite conocer la representación espectral de cualquier señal y a partir de allí analizarla o modificarla. El desarrollo de esta práctica se centra en la transformada rápida de Fourier, o FFT, ya que este algoritmo permite calcular la DFT y la IDFT de una señal de una manera óptima en aplicaciones de tiempo real.

Con esta práctica se busca que los estudiantes puedan:

- Escribir un programa que permita realizar la FFT y la IFFT de una señal
- Conocer y aplicar el concepto de ventanas a señales en el tiempo
- Calcular la FFT e IFFT aprovechando el acelerador por hardware que ofrece el DSP

Y los siguientes conceptos previos son necesarios para el desarrollo de esta práctica:

- Manejo de cantidades complejas
- *Hardware Accelerator*
- Uso de ventanas
- *Bit reversing*

*Filtros FIR.* Los filtros son quizá los elementos más importantes del procesamiento de señales. Por esto, en esta y en las siguientes prácticas se explican y usan algunos de los más importantes.

Con esta práctica se busca que los estudiantes puedan:

- Manejar e implementar buffers circulares
- Implementar un filtro FIR usando la forma directa
- Implementar un filtro FIR por convolución usando la librería “Dsplib”
- Utilizar la librería de Texas Instruments *Chip Support Library*, para el manejo de datos desde el módulo “MMC/SD”

Y los siguientes conceptos previos son necesarios para el desarrollo de esta práctica:

- Buffers circulares
- Forma directa del filtro FIR
- Filtrado por convolución: *overlap and add*, *overlap and save*

*Filtros IIR.* Junto con los filtros FIR, los IIR son los filtros más comunes usados en procesamiento de señales. Su implementación es computacionalmente un poco más compleja por ello se sugiere que sean enseñados con mayor detenimiento (Orfanidis, 1995).

Con esta práctica se busca que los estudiantes puedan:

- Implementar filtros IIR en forma directa y en forma canónica
- Implementar filtros bicuadráticos, sencillos y en cascada
- Implementar osciladores recursivos (Kuo & Lee, 2001)

Y los siguientes conceptos previos son necesarios para el desarrollo de esta práctica:

- Formas: directa, canónica y en cascada de los filtros IIR
- Osciladores recursivos

*Filtros adaptativos y filtros pasa-todo.* Un filtro adaptativo es un sistema variable en el tiempo que modifica sus parámetros de acuerdo a una señal de entrada y a una señal de referencia. Normalmente estos parámetros variables son los coeficientes de los filtros FIR o IIR (Haykin, 2013). Por otro lado, un filtro pasa-todo es un filtro IIR de cualquier orden que tiene una respuesta constante en el espectro de frecuencia pero que modifica la fase de dichas componentes. Los filtros pasa-todo son conocidos también como “ecualizadores de fase” (Regalia, Mitra, & Vaidyanathan, 1988).

Con esta práctica se busca que los estudiantes puedan:

- Conocer las diferentes estructuras de los filtros adaptativos

- Implementar un filtro adaptativo FIR mediante el algoritmo LMS
- Implementar un filtro *notch* a partir de un filtro pasa-todo

Y los siguientes conceptos previos son necesarios para el desarrollo de esta práctica:

- Estructuras de los filtros adaptativos
- Algoritmo LMS
- Filtros pasa-todo
- Filtros complementarios
- Filtros *notch*

*Multirate processing.* Esta técnica de procesamiento sirve para economizar recursos digitales del hardware al separar las señales en bandas de frecuencia para ser tratadas de acuerdo a sus requerimientos mínimos necesarios (Manolakis & Ingle, 2011).

Con esta práctica se busca que los estudiantes puedan:

- Implementar las técnicas de: *up-sampling* y *down-sampling*
- Utilizar la CSL para el manejo de los pulsadores de la tarjeta
- Conocer la teoría de *re-sampling* y *delays* fraccionales
- Implementar filtros *anti-aliasing* y *anti-imaging*

Y los siguientes conceptos previos son necesarios para el desarrollo de esta práctica:

- *Down-sampling* y *up-sampling*
- Procesamiento en bandas de frecuencia
- *Delays* fraccionales

### 3. SUGERENCIAS ADICIONALES PARA EL DESARROLLO DEL CURSO

La elaboración de un curso no debe limitarse a la selección de los contenidos teóricos o prácticos del mismo. Diferentes aspectos como: la evaluación, las herramientas usadas para la enseñanza, la intensidad horaria y el contexto en el que se desarrolla deben tenerse en cuenta para que la transmisión del conocimiento sea óptima. Por esta razón se exponen a continuación otros aspectos que permitan la creación de un curso integral en procesamiento digital de señales.

#### 3.1. *Temas adicionales*

Las secciones anteriores describen los temas fundamentales que deberían ser abordados en un curso básico en procesamiento digital de señales. Sin embargo, la duración de un semestre académico (aproximadamente 16 semanas) y la intensidad horaria semanal correspondiente a un curso de pregrado (4 o 5 horas), impiden el desarrollo de temas adicionales de gran valor académico y práctico en esta rama de la ingeniería.

Se deja a consideración del docente la profundización en los temas ya descritos o la inclusión de alguno de los temas que se proponen a continuación, en caso de que el desarrollo del curso lo amerite:

- Programación en lenguaje *assembly*
- *Boot* desde la memoria *Flash*
- Modulaciones en amplitud y frecuencia
- Envolventes temporales: ADSR
- Ecuilibradores gráficos y paramétricos
- Codificación y cuantización
- Algoritmos de compresión y expansión
- STFT, transformada discreta del coseno, *wavelet transform* y otras transformadas para análisis espectral
- Tramado o *Dither*

### 3.2. Trabajo final

Para evaluar el aprendizaje general del curso, se propone la realización de un trabajo final de tema libre de mayor complejidad que cada una de las prácticas realizadas. En este, se espera que los estudiantes empleen varios de los conceptos enseñados y que usen para ello los diversos módulos y librerías disponibles en el kit de desarrollo. Como:

- Leds, *display*, pulsadores, módulo SD
- Entradas y salidas de audio estéreo
- Dsplib
- CSL y los módulos: SPI, I2S, I2C, etc., para interactuar con elementos externos al kit, analógicos y digitales
- *Hardware accelerator*
- Puerto de expansión

Además, se sugiere que los temas tentativos de este trabajo sean presentados con anterioridad al docente a través de un anteproyecto para que este evalúe su viabilidad y competencias. Es importante que dentro de su desarrollo, el trabajo final contenga la investigación de temas y elementos diferentes a los vistos durante el curso. Algunas ideas de trabajo, con un alcance similar al esperado por parte de los estudiantes, son:

- Compresor de audio MP3 (u otro formato)
- Detector de tiempo en piezas musicales
- Banco de efectos para guitarra (Saebi & Moses)
- *Time stretching*
- Afinador de guitarra automático
- Sintetizador musical



### 3.3. Evaluación

Ya que el desarrollo del curso se centra en los aspectos prácticos del procesamiento digital de señales, se sugiere una calificación que de mayor peso a esta parte del curso. Sin embargo, también es importante que sean evaluadas de alguna manera las bases teóricas tanto de sistemas y señales como del lenguaje C. En la Tabla 12 se muestran las actividades evaluativas que podrían llevarse a cabo durante el curso, así como los pesos sugeridos para cada una. Se propone que todas las prácticas tengan el mismo valor porcentual.

Tabla 2. Porcentajes evaluativos

Tema	Peso
Quiz Sistemas y Señales	5 %
Quiz lenguaje C	5 %
Prácticas	70 %
Trabajo final	20 %

### 3.4. Cronograma de actividades

En la Tabla 3 se especifica el tiempo y orden sugerido para la enseñanza de las actividades del curso durante las 16 semanas del semestre académico.

Además, se sugiere que la intensidad del curso sea de 5 horas semanales, separadas en un bloque de 2 horas y en otro de 3 horas. La intención de esta cantidad de horas, es que los conceptos

previos y las prácticas se puedan completar en clase y el trabajo independiente sea mínimo.

## 4. POTENCIAL

Las diversas instituciones académicas tienen la misión de estar constantemente en la búsqueda de tecnologías y temáticas pertinentes al contexto social, económico y político de los programas académicos para formar profesionales íntegros que puedan responder a las exigencias de un medio siempre cambiante. Por esto es importante para la Universidad Pontificia Bolivariana la presencia de una materia en procesamiento digital de señales contenida en el plan de estudios de Ingeniería Electrónica (y afines), tal y como sucede en otras grandes universidades del mundo.

Se espera que el desarrollo de este trabajo de grado siembre en la facultad y en los nuevos ingenieros un gusto por el audio que vaya mucho más allá de la creación y el estudio de un curso. Y que a partir de allí puedan gestarse semilleros y grupos de investigación de los que surjan proyectos e invenciones de gran impacto para nuestro medio.

## 5. CONCLUSIONES

Luego de finalizar la investigación y escritura del trabajo de grado se tiene la certeza de que se han cumplido satisfactoriamente los objetivos propuestos inicialmente. Sin embargo, al analizar minuciosamente los diversos componentes del proyecto pueden encontrarse puntos que no se tuvieron en cuenta desde el inicio o

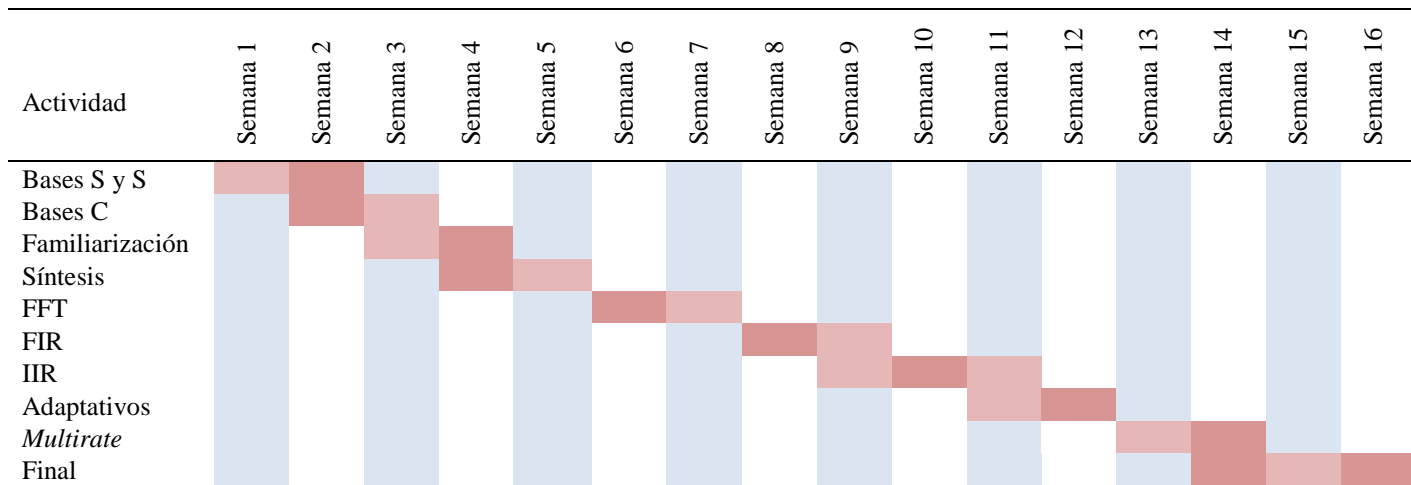
que pueden ser desarrollados con mayor profundidad. Esto no denota una incompletud del trabajo, por el contrario, fue la completud del mismo la que permitió el reconocimiento de temáticas que por su extensión y riqueza requerirían un curso de mayor extensión y alcances para ser abordadas adecuadamente.

El objetivo de la docencia y de este trabajo de grado va más allá de la enseñanza de los temas propuestos. Al desarrollar el proyecto, se hace notorio que aun cuando el área principal de estudio (el audio) es apasionante, algunos de los temas pueden resultar tediosos de explicar y de aprender. Por esto, aparte de

pensar en el desarrollo de los contenidos de cada práctica, también fue importante la búsqueda de un método agradable y motivador de transmitir cada temática a los posibles estudiantes del curso.

Una de las herramientas que más facilitó el desarrollo del trabajo, fue la escogencia asertiva del módulo de desarrollo. No solo por sus capacidades, sino por la cantidad y excelente calidad de la documentación disponible, las librerías y los foros activos alrededor del TMS320C5535 eZdspTM.

Tabla 3. Cronograma del curso



Otro factor clave para la realización del trabajo, fue el uso del lenguaje C en lugar del lenguaje assembly para la programación de las prácticas. C permite una portabilidad y abstracción de códigos mucho más intuitiva y fácil. Además, facilita la interpretación de códigos ajenos, permitiendo así una mayor divulgación de información y contenidos, disponible abiertamente en la web. Esto permite un mejor y mayor avance al enfrentar problemas en cada aplicación.

Si bien el hardware usado responde a las necesidades académicas del curso, es deseable que se pueda contar con una herramienta de mayores prestaciones que permita abordar conceptos de mayor complejidad. Con esto dicho y con los temas adicionales que se propusieron, sería muy posible la construcción a futuro de un curso avanzado en procesamiento digital de señales. Estos posibles equipos podrían elegirse de la misma familia del hardware usado (como el TMS320C6455 o el TMS320C6747, de Texas Instruments), con la finalidad de extender fácilmente el curso desarrollado con los temas adicionales, además de servir óptimamente para el uso en grupos o semilleros de investigación.

## REFERENCIAS

- Embree, P. M. (1995). *C algorithms for real-time DSP*. Upper Saddle River, New Jersey, Estados Unidos: Prentice Hall.
- Haykin, S. O. (2 de Junio de 2013). *Adaptive Filter Theory. 5*. Upper Saddle River, New Jersey, Estados Unidos: Prentice Hall.
- Kuo, S. M., & Lee, B. H. (2001). *Real-Time Digital Signal Processing. Implementations, applications and experiments with the TMS320C55x*. Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons, LTD.
- Manolakis, D. G., & Ingle, V. K. (2011). *Applied Digital Signal Processing*. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.
- Orfanidis, S. J. (Agosto de 1995). *Introduction to Signal Processing*. Upper Saddle River, New Jersey, Estados Unidos: Prentice Hall.
- Regalia, P. A., Mitra, S. K., & Vaidyanathan, P. P. (Enero de 1988). The Digital All-Pass Filter: A Versatile Signal Processing Building Block. *Proceedings of the IEEE*, 76(1), 19-37.
- Saebi, P., & Moses, P. (s.f.). *Wireless Embedded Sensing System Lab*. Recuperado el 12 de Febrero de 2015, de <http://wiesel.ece.utah.edu/redmine/projects/dfx/wiki>
- Texas Instruments Incorporated. (Agosto de 2001). *TMS320C55x DSP Programmer's Guide*. Dallas, Texas, Estados Unidos.
- Texas Instruments Incorporated. (Agosto de 2011). *TMS320C5535, 'C5534, 'C5533, 'C5532 Fixed-Point Digital Signal Processors. SPRS737C*. Dallas, Texas, Estados Unidos.
- Texas Instruments Incorporated. (Diciembre de 2011). *TMS320C55x Optimizing C/C++ Compiler v 4.4. User's Guide. SPRU281G*. Dallas, Texas, Estados Unidos.

## AUTORES



Luis Eduardo *MARTÍNEZ FERRÍN*. Egresado próximo a graduarse del programa de Ingeniería Electrónica. Diplomado en docencia universitaria. Socio de la empresa de amplificadores, pedales y guitarras Lovell Musiclab, donde trabaja como Ingeniero Electrónico. Músico, guitarrista y melómano empírico.



Alejandro *ROSSO PÉREZ*. Egresado próximo a graduarse del programa Ingeniería Electrónica. Diplomado en docencia universitaria. Estudiante de música en la academia Studio Ensamble. Flautista, guitarrista y aprendiz de *Lutheria*.