

Algoritmo de Reflexión y Desplazamiento en Señales de Voz y Audio con Base en la Plataforma TMS320c6711 DSK

Reflection and Displacement Algorithm for Voice and Audio Signals Based in TMS320c6711 DSK platform

Jovani A. Jiménez Builes¹PhD, Gustavo A. Acosta Amaya²MSc(c), Camilo A. Flórez Velásquez²Ing.

1 GIDIA: Grupo de Investigación y Desarrollo en Inteligencia Artificial,
Escuela de Ingeniería de Sistemas, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia

2 Grupo de Investigación en Telecomunicaciones,
Facultad de Ingeniería de Telecomunicaciones, Universidad Santo Tomás
jajimen1@unal.edu.co, gacosta@ustamed.edu.co, cflorez@ustamed.edu.co

Recibido para revisión 28 de Marzo de 2008, Aceptado 19 de Mayo de 2008, Versión final 21 de Mayo de 2008

Resumen— En este artículo se describe un algoritmo de reflexión y desplazamiento de señales de voz y audio. La implementación de algoritmos como este busca afianzar las bases conceptuales y procedimentales en los procesos formativos de los cursos de Procesamiento Digital de Señales (DSP) que se imparten en los programas de ingeniería electrónica, control y telecomunicaciones.

Palabras Claves: Algoritmia, DSP, Interpolación, Cuantización, Filtrado, Sistemas LTI.

Abstract—This paper describes a reflection and displacement algorithm for voice and audio signals. The algorithm implementation tries to define the conceptual and procedural bases for formative processes of Digital Signals Processing (DSP) courses given in electronic, control and telecommunicating engineering programs.

Keywords: Algorithm, Digital Signals Processing (DSP), Interpolating, Quantizing, Filtered, Linear Time- Invariant systems..

I. INTRODUCCIÓN

El Procesamiento Digital de Señales (DSP) constituye una rama relativamente nueva de la ingeniería; su ámbito de interés se relaciona con la representación digital de señales y la implementación por software o hardware de algoritmos que permitan analizar, transformar o extraer información de dichas señales [1].

Los primeros desarrollos en DSP surgen de la necesidad de dar soluciones prácticas a problemas en los campos de las telecomunicaciones, el control digital y el procesamiento de bioseñales. Debido al inusitado crecimiento en la demanda mundial de ingenieros con sólidos conocimientos en DSP, emergió la necesidad de consolidar procesos formativos a nivel

de postgrado inicialmente, y de pregrado posteriormente.

La mayoría de los cursos de DSP se encuentran ubicados en semestres intermedios en los planes de estudio de programas de ingenierías tales como electrónica, eléctrica, telecomunicaciones y afines. En estos niveles se pretende desarrollar en los estudiantes competencias de tipo argumentativas y propósitivas [3] que para estos programas exigen un trabajo intensivo de laboratorio.

En la actualidad, gran parte de los cursos de formación en el campo del DSP que ofrecen las instituciones universitarias del país no cuentan con herramientas tecnológicas que apoyen los procesos formativos teórico-prácticos que demanda la sociedad actual.

En este artículo se describe la implementación de un algoritmo de reflexión de señales de voz y audio que ilustra algunos de los conceptos fundamentales de la teoría DSP y sienta las bases procedimentales relativas a esta área del conocimiento.

La sección dos aborda las generalidades de los sistemas modernos para el procesamiento digital de señales análogas. La sección tres presenta un diseño general para el precondicionamiento análogo de señales de audiofrecuencia. La sección cuatro describe el algoritmo de reflexión y desplazamiento propuesto. Finalmente, en la sección cinco se presentan las conclusiones y líneas de trabajo futuro.

II. GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS PARA EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES ANÁLOGAS

Como la mayoría de las señales en la naturaleza, las señales sonoras (p. ej. voz humana) son señales análogas o señales

continuas en el tiempo y la amplitud [1] que se pueden procesar digitalmente mediante un sistema como el que se muestra en la figura 1. En este artículo se describe la implementación práctica de un efecto especial de audio sobre la plataforma DSP TMS320C6711 DSK de la compañía Texas Instruments.

El algoritmo descrito se fundamenta en dos transformaciones básicas de señal conocidas como desplazamiento y reflexión, transformaciones que se llevan a cabo sobre la variable independiente (Dominio del tiempo discreto).

Antes de ser procesada digitalmente, la señal de voz (o audio) que corresponde a una señal análoga unidimensional, debe ser convertida de onda mecánica de presión a señal eléctrica y sometida a un Preacondicionamiento Análogo de Señal (PAS) antes que su ancho de banda sea limitado por el Filtro Antialiasing (FA).

De acuerdo con el teorema del muestreo de Nyquist–Shannon [4][5] una señal análoga con ancho de banda finito (B) deberá ser muestreada a una frecuencia F_s mayor que la tasa de Nyquist [8][9], esto es:

$$F_s > 2B \quad (1)$$

Donde F_s es la frecuencia de muestreo y B es el ancho de banda de la señal análoga a ser procesada.

La aplicación rigurosa del teorema de Nyquist–Shannon garantiza que:

- Durante el proceso de muestreo (Figura 1), suficiente cantidad de información contenida en una señal análoga $x(t)$ se transfiere a la versión discreta de ésta, $x(nT)$, siendo posible recuperar la señal análoga original si se aplica algún algoritmo de reconstrucción o interpolación a las muestras obtenidas durante la discretización [1][5].

- Se evita un fenómeno conocido como “aliasing”, el cual se presenta durante el muestreo de señales y consiste en que no es posible distinguir las componentes frecuenciales de una señal análoga cuando la frecuencia de muestreo seleccionada para una aplicación particular no cumple con el teorema de muestreo [7][12].

Los DSPs operan sobre señales digitales (Señales discretas en el tiempo y en la amplitud) por lo que las señales análogas a ser procesadas deberán ser primero convertidas a formato digital [2]. El proceso de conversión A/D (Análogo/Digital) involucra los siguientes pasos:

A. Muestreo

La señal análoga $x(t)$, limitada en ancho de banda, se muestrea (Sample) para obtener una señal discreta en el tiempo y continua en la amplitud (Secuencia) [1].

B. Retención

La amplitud de cada muestra es retenida (Hold) durante el lapso de tiempo que requiere el cuantizador (Q) para asignarle un valor de un conjunto finito de valores, a la muestra retenida [1][6].

C. Cuantización

Como resultado del proceso de cuantización, los valores continuos de amplitud son aproximados a valores discretos representados por un número finito (2N) de códigos binarios de N bits [9].

El algoritmo de cuantización asigna a distintos valores de amplitud un mismo valor discreto, por lo que no se puede evitar la pérdida de información asociada a este proceso (Error de cuantización) [6].

En la plataforma de desarrollo TMS320C6711 DSK, en la que se implementa el algoritmo, las funciones de filtrado (Antialiasing e interpolación), muestreo, retención, cuantización y conversión digital análoga (D/A) las lleva a cabo el circuito integrado TLC320AD535. Este circuito es un Codec (Codificador/Decodificador) de doble canal, voz y datos, basado en una arquitectura sigma-delta de sobremuestreo (Oversampling) apropiada para aplicaciones que demandan alta resolución y no precisan altas frecuencias de muestreo [9][10]; por ejemplo, procesamiento digital de voz en sistemas PBX, telefonía celular y otras.

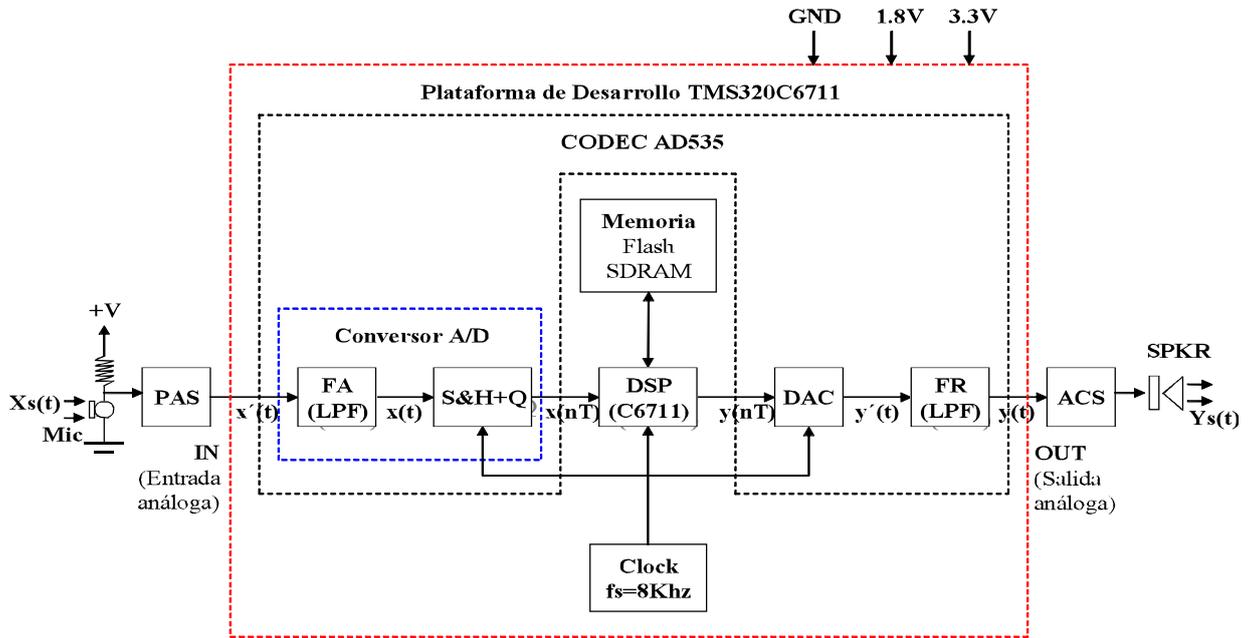
La tarjeta DSK sólo habilita el canal de voz del Codec AD535 y fija su frecuencia de muestreo F_s en 8 KHz lo que permite procesar directamente señales de voz y audio de baja calidad.

El corazón del sistema que se muestra en la figura 1 es un procesador DSP de punto flotante, el TMS320C6711, en el que se implementan los algoritmos de mapeo digital que permitan obtener la secuencia de salida $y(nT)$ a partir de la secuencia de entrada $x(nT)$ mediante una ley de transformación:

$$y(nT) = \mathcal{T}[x(nT)] \quad (2)$$

donde $\mathcal{T}[\]$ corresponde al algoritmo de desplazamiento y reflexión implementado

El DSP C6711 cuenta con dos puertos seriales síncronos multicanal que proveen comunicaciones full-duplex de alta velocidad. Las muestras de entrada y salida se transfieren serialmente entre el audiocodec AD535 y el microprocesador DSP a través del puerto serial 0 (McBSP0) con un formato de palabra digital de 16 bits (Figura 2) [10][11].



Elementos constitutivos de un sistema DSP:

MIC: Micrófono Piezoelectrico.	PAS: Preacondicionamiento Analogo de Señal.
FA: Filtro Antialiasing (Filtro analogo pasa-bajos)	S&H+Q: Circuito de Muestreo (Sample), Retención (Hold) y Cuantización (Quantizer)
DSP: Procesador Digital de Señales.	DAC: Conversor Digital Analogo (Interpolador)
FR: Filtro Analogo de Reconstrucción o Suavizado (Smoothing Filter).	ACS: Acoplamiento Analogo de Señal de Salida.
Fs: Frecuencia de Muestreo.	T = 1/Fs: Intervalo de Muestreo.

Figura 1. Diagrama de bloques de un sistema para el procesamiento digital de señales análogas.

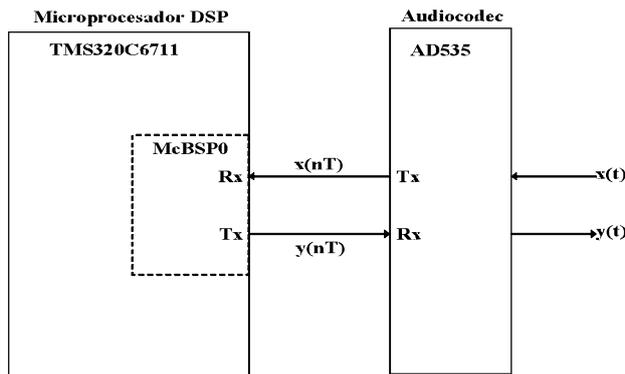


Figura 2. Transferencia de datos entre el microprocesador DSP y el AudioCodec

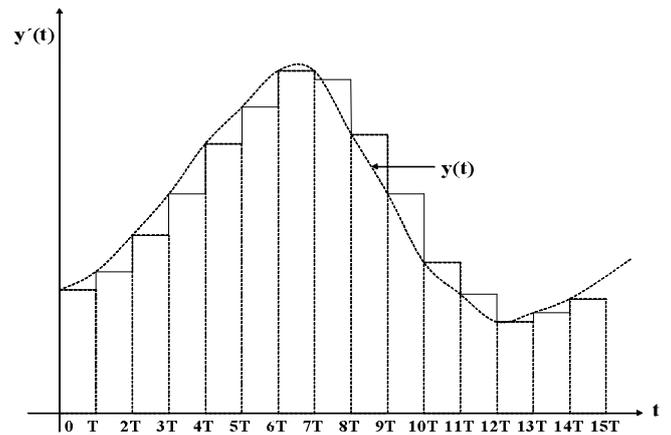


Figura 3. Señal escalonada de salida de un DAC

Las muestras que componen la señal digital de salida $y(nT)$, son transferidas del DSP al audiocodec AD535 el cual realiza dos funciones sobre éstas. Inicialmente efectúa una conversión digital analoga (DAC) o interpolación que constituye el paso previo en la generación de una señal analoga de salida $y(t)$.

La conversión digital analoga permite obtener una señal $y'(t)$ continua en el tiempo pero aún discreta en amplitud. La señal $y'(t)$ es una señal escalonada, esto es, una señal que mantiene su amplitud durante un intervalo completo de muestreo (Figura 3).

La segunda y última operación que realiza el Codec consiste en suavizar los cambios bruscos de amplitud que presenta $y'(t)$. El suavizado se lleva a cabo haciendo pasar la señal a través de un filtro de reconstrucción.

Rigurosamente hablando, la función real del filtro de reconstrucción consiste en remover (Smoothing) las componentes de alta frecuencia incorporadas a la señal $y'(t)$ como resultado de la acción de retención de amplitud que realiza el DAC. Esta distorsión se conoce como distorsión de apertura y en el dominio de la frecuencia se modela mediante

la función Sinc(x) también conocida como función de filtrado o de interpolación.

III. AMPLIFICADOR LOGARÍTMICO DE DOS CUADRANTES

El Codec AD535 con el que cuenta la tarjeta de desarrollo DSK, tolera un voltaje de entrada máximo absoluto de 3Vpp. Surge la necesidad de construir un sistema que confine la amplitud de la señal de audio de entrada a límites permisibles y seguros. Se estudiaron varias alternativas que permitieran restringir los niveles de voltaje de la señal de audio, con base en circuitos limitadores y recortadores con diodos semiconductores estándar o diodos zener.

La principal desventaja de estos circuitos es que introducen una cantidad apreciable de armónicos modulantes e intermodulantes que distorsiona la señal de audio de salida (THD%RMS Total Harmonic Distortion) fundamental RMS de dicha señal, lo que se traduce en una desagradable alteración a nivel auditivo de la señal. Otra opción consistió en implementar un amplificador para restringir la amplitud de la señal con una inyección mucho menor de armónicos modulantes e intermodulantes que permitiera evitar así la alteración indeseada del espectro original de la señal. Para tal fin, se seleccionó un sistema electrónico conocido como “Amplificador Logarítmico de dos Cuadrantes con Ganancia de Voltaje y Zona Lineal Ajustable”.

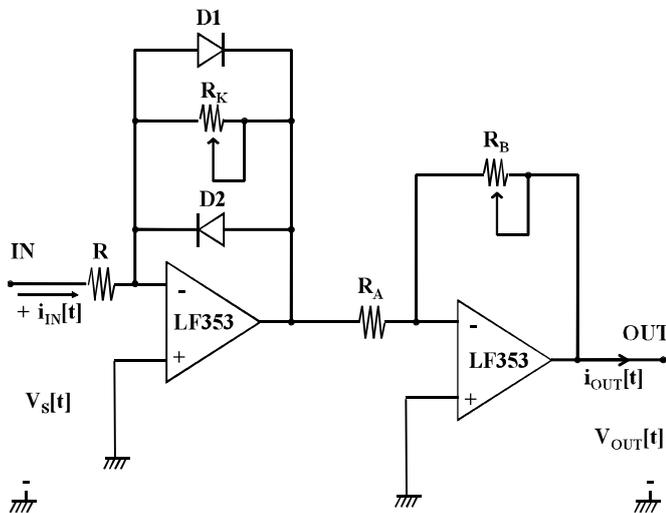


Figura 4. Amplificador logarítmico para el precondicionamiento analógico de señales de audiofrecuencia.

Esta topología circuital (Figura 4) permite mantener intacto el espectro original de la señal de audio con una ganancia constante ($A_v \in R_e$) cuando la amplitud de la señal de voltaje de entrada se encuentra en el rango $[-V_A, V_A]$. Por fuera de este rango, el amplificador comienza a disminuir de forma automática la ganancia A_v de tal forma que el voltaje de salida no sobrepase un límite permisivo de voltaje $[-V_B, V_B]$. V_A , V_B y A_v pueden ser controlados por el usuario mediante el ajuste de los potenciómetros R_K y R_B .

La expresión que rige la salida del amplificador logarítmico implementado es:

$$V_{out}(t) = \begin{cases} -\frac{RB}{RA} K1 \ln[-K2 V_s(t) + 1] & \text{si } \frac{Rk}{R} V_s(t) < -0.6V \\ \frac{Rk}{R} \frac{RB}{RA} V_s(t) & \text{si } -0.6V < \frac{Rk}{R} V_s(t) < 0.6V \\ \frac{RB}{RA} K1 \ln[K2 V_s(t) + 1] & \text{si } \frac{Rk}{R} V_s(t) > 0.6V \end{cases}$$

Donde:

$$K2 = \frac{1}{Ri_s}$$

$$K1 = \eta V_t$$

η : Coeficiente de excitación del diodo

i_s : Corriente de saturación inversa

V_t : Voltaje térmico que se calcula como

$$V_t = KT/q$$

K : Constante de Boltzman = 1.38×10^{-23} (Joule/K)

T : Temperatura de trabajo de la juntura semiconductor del diodo (K)

q : Carga fundamental del electrón = 1.6×10^{-19} (Coulomb)

La función de transferencia del amplificador se enseña en la figura 5, en esta se aprecia claramente la zona de ganancia lineal y las zonas donde se produce el control automático de la ganancia.

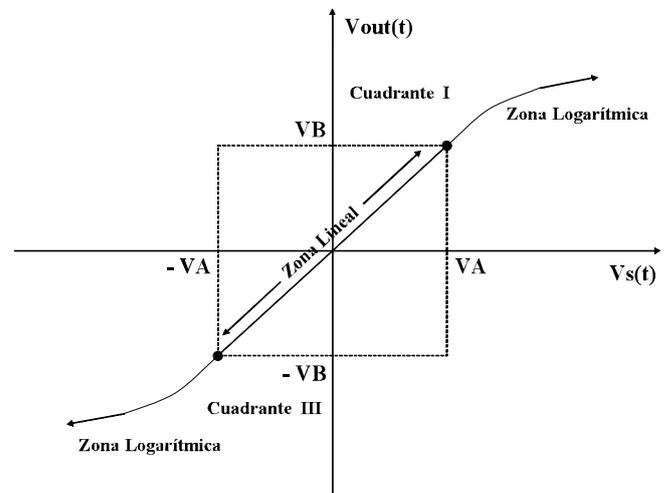


Figura 5. Función de transferencia del amplificador logarítmico de dos cuadrantes.

IV. ALGORITMO DE REFLEXIÓN PROPUESTO

A. Plataforma DSP

El algoritmo propuesto está implementado en la tarjeta de desarrollo TMS320C6711 DSK que se ajusta a la descripción en diagramas de bloques que se muestra en la figura 1. Este hardware constituye una plataforma completa para la evaluación en tiempo real de algoritmos DSP y permite procesar de forma directa señales de audiofrecuencia.

La plataforma se fundamenta en dos dispositivos: (1) un procesador DSP de punto flotante de última generación, basado en una arquitectura VLIW (Very Large Instruction Word) modificada, con la cual se obtienen desempeños de hasta

1200MIPS (Million Instructions per Second) en punto flotante y hasta 900MFLOPS (Million of Floating-Point Operation per Second) cuando el procesador opera a 150Mhz; y (2) un Codec para aplicaciones de audio al cual se le ha fijado la frecuencia de muestreo en 8Khz.

B. Software de Desarrollo

El Code Composer Studio (CCS) incorpora en un ambiente integrado de desarrollo (IDE) las herramientas de software requeridas para el desarrollo de aplicaciones. Permite generar archivos ejecutables (Extensión .out) a partir de diferentes archivos fuentes (C, C++, Assembler, entre otros) compilados y enlazados con diferentes librerías para generar un único archivo de salida.

C. Descripción del Algoritmo

A través del conversor A/D del Codec se toman muestras de la señal de audio de entrada cada 125 μ s, lo que corresponde a una frecuencia de muestreo de 8Khz. Las muestras se transfieren del Codec al DSP de forma serial sincrónica a través del puerto McBSP0.

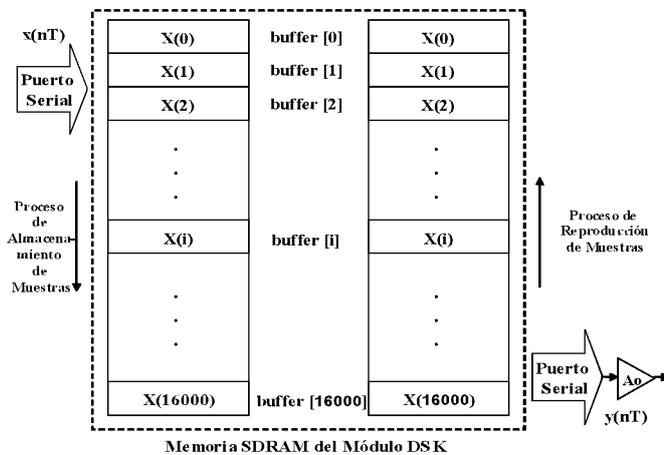


Figura 6. Proceso de lectura/escritura del arreglo de datos en el algoritmo de reflexión de señales de audio

En el DSP se han habilitado las interrupciones del puerto serial mediante la función `comm_intr()`, de tal forma que siempre que se reciba un dato por el puerto, se genera una interrupción (`int11`).

La rutina de atención a interrupción, `c_int11()`, almacena en un arreglo unidimensional de 16000 elementos, hasta 16000 x 125 μ s = 2seg de la señal de audio de entrada y las muestras de salida se calculan barriendo el buffer en sentido inverso, con lo que se obtiene el efecto de reflexión deseado; por ejemplo, si en el transductor de entrada se inyecta la señal de audio equivalente a la palabra "hola", se escucha en el altavoz de salida la palabra "aló".

La figura 6 se ilustra el proceso de almacenamiento y reproducción de las muestras almacenadas en el buffer. A continuación se detalla el código fuente:

```
// Código de Reflexión para módulo DSK // TMS320C6711
int i = 0;
int j = 0;
int ok = 0;
int buffer_length = 16000;
short buffer[16000];
short salida;
// Rutina de servicio de interrupción
interrupt void c_int11()
{
// Llenado de buffer con muestras de la
// señal de audio
buffer[i] = input_sample();
// Se calcula la salida y se reproduce
// el arreglo en sentido inverso
salida = 3*buffer[buffer_length - i];
output_sample(salida);
// Se actualiza puntero
i++;
// Fin de buffer? Si: Retorna a la
// dirección inicial del buffer.
// No: Continúa
if(i>=buffer_length) i=0;
// Retorna al programa principal
return;
}
void main()
{
// Configura comunicaciones seriales por
// interrupción
comm_intr();
// Espera interrupciones del McBSP0
while(1);
}
```

V. CONCLUSIONES

Los algoritmos de DSP de alta complejidad ampliamente usados en aplicaciones industriales y comerciales, se basan en mayor o en menor grado en operaciones simples efectuadas sobre la variable independiente. Desde este punto de vista, es importante apoyar la conceptualización teórica mediante el diseño e implementación de aplicaciones simples que ilustren los conceptos y fundamentos propios del área.

Existen una serie de conceptos de DSP que a nivel teórico lucen vagos y en cierto grado abstracto, pero mediante un afortunado diseño de sesiones prácticas, se puede apropiarse el estudiante de estos fundamentos bajo la luz de la experiencia de campo del laboratorio y encontrar nuevos significados más claros y edificantes para las bases en cuestión.

Una vez se desarrolla la etapa de fundamentación práctica en relativamente corto tiempo, es recomendable continuar con la exploración de aplicaciones más elaboradas en las áreas de las telecomunicaciones, el control automático, electrónica y otras.

REFERENCIAS

- [1] Ifeachor, E.; Jervis, B. (1993) *Digital Signal Processing: A Practical Approach*. Addison-Wesley Publishing Company. Workingham, England.
- [2] Pasqualia, G.; Ciaranfib, F.; Bardellia, L.; Binia, M.; Boianoc, A.; Giannellia, F.; Ordinec, A.; Poggi, G. (2007) A DSP Equipped Digitizer for Online Analysis of Nuclear Detector Signals. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. Vol. 570, Issue 1, 1 January 2007, Pages 126-132.
- [3] Londoño, L.; Jiménez, J.; Pérez, A.; Castro, C. (2005) Evaluación de Competencias en el Área de Ciencias Básicas en Ingeniería utilizando Micromundos con Dinámica de Sistemas y Lógica Difusa. En: *Revista Cintex*. v.1, n.11, p.12 – 25.
- [4] Taylor, F. (2000) EEL4750C: Introduction to Digital Signal Processing (DSP) Lesson Title: Aliasing Basics. University of Florida.
- [5] McClellan, J.; Schafer, R.; Yoder, M. (1999) *DSP First: A Multimedia Approach*. Prentice-Hall. Upper Saddle River, New Jersey.
- [6] Soria, E.; Martínez, M.; Francés, J.; Camps, G. (2003) *Tratamiento Digital de Señales: Problemas y Ejercicios Resueltos*. Pearson Prentice-Hall. Madrid, España.
- [7] Strum, R.; Kirk, D. (1989) *First Principles of Discrete Systems and Digital Signal Processing*. Addison-Wesley Publishing Company Reading. Massachusetts, USA.
- [8] Burrus, S.; McClellan, J.; Oppenheim, A.; Alan, V.; Parks, T.; Schafer, R.; Schuessler, H. (1998) *Ejercicios de Tratamiento de la Señal utilizando MATLAB V.4: Un Enfoque Práctico*. Prentice-Hall. Madrid, España.
- [9] Kehtarnavaz, N.; Keramat, M. (2001) *DSP System Design Using the TMS320C6000*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA.
- [10] Chassaing, R. (2002) *DSP Applications Using C and the TMS320C6X DSK*. Jhon Wiley and Sons Eds. New York, USA.
- [11] Tretter, S. (2003) *Communication System Design Using DSP Algorithms with Laboratory Experiments for the TMA320C6701 and TMS320C6711*. Kluwer Academic / Plenum Publishers. New York, USA.
- [12] Irarrázaval, P. (1999) *Análisis de Señales*. McGraw Hill Interamericana. Santiago, Chile.
- Jovani Alberto Jiménez Builes**. Profesor Asistente, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Coordinador de Servicios Académicos Virtuales de la UNAL Sede Medellín. Coordinador de la Comisión Pedagógica de la Facultad de Minas. Doctor en Ingeniería Sistemas e Informática, Universidad Nacional de Colombia. Pasantía Doctoral Grupo de Inteligencia Artificial Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Brasil. Magister en Ingeniería de Sistemas de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. Licenciado en Docencia de Computadores, Universidad de Medellín – Colombia. El área de énfasis de su investigación es Inteligencia Artificial, más específicamente Inteligencia Artificial en Educación, Sistemas Tutoriales Inteligentes, Sistemas basados en CBR (CaseBased Reasoning) y Técnicas de Planificación Instruccional. Adicionalmente, trabaja sobre un proyecto de Robótica Colaborativa utilizando Técnicas de Inteligencia Artificial Distribuida.
- Gustavo Acosta Amaya**, MSc.(c). Candidato a Magister en Ingeniería de Sistemas, Universidad Nacional de Colombia. Área de énfasis investigativo en inteligencia artificial y robótica. Ingeniero Electricista, Universidad Nacional de Colombia. Docente investigador de la Facultad de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad de Santo Tomás de Medellín. Integrante del grupo de investigación en telecomunicaciones METELLIUM de la Universidad de Santo Tomás de Medellín. Coordinador del Programa de Ingeniería Electrónica, integrante del Grupo de Investigación en Modelamiento y Simulación Computacional GIMSC y Coordinador del Semillero de Investigación en Robótica Móvil GIRMO, todos de la Universidad de San Buenaventura seccional Medellín, Colombia.
- Camilo Andrés Flórez Velásquez**. Ingeniero Electricista, Universidad Nacional de Colombia. Área de énfasis investigativo en procesamiento de señales, Electrónica de Radiofrecuencia y robótica. Docente investigador de la Facultad de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad Santo Tomás de Medellín. Integrante del grupo de investigación en Telecomunicaciones METELLIUM de la Universidad de Santo Tomás de Medellín. Integrante del Grupo de Investigación en Modelamiento y Simulación Computacional GIMSC y del Semillero de Investigación en Robótica Móvil GIRMO, todos de la Universidad de San Buenaventura seccional Medellín, Colombia.