

62: una Herramienta Interactiva para el Estudio del Tratamiento Digital de la Señal

José B. Mariño Acebal, Francesc Vallverdú i Bayés, Luis Ubeda Hernández
Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones, E.T.S.I. Telecomunicación, UPC
Aptdo. 30002. 08080-Barcelona, Telf: (93) 401 64 44, Fax: (93) 401 64 47
E-mail: canton@tsc.upc.es

Abstract.: In this paper we describe the program 62, a Discrete-Time Processing Educational Interactive Tool, running over a personal computer and using an EVM board (TMS 320C30 DSP) from Texas Instruments. This program provides a friendly framework to practice the Discrete-Time Processing concepts, without using any programming language. The exercises are carried out by selecting options in a menu and providing the corresponding data. The tool includes real-time analog signal processing capabilities, that allow the students to gain insight about the interface between the Continuous-Time and the Discrete-Time domains.

1.- Introducción

Tal como están diseñados los planes de estudios actuales y serán establecidos con toda seguridad en el futuro, el estudiante aborda el estudio de las señales y los sistemas en tiempo discreto tras haber recibido solamente una descripción del mundo en tiempo continuo, lo que llamamos una visión analógica. Creemos que ello induce una dificultad importante para que el estudiante penetre en la esencia del mundo discreto, ya que por tendencia natural tratará de interpretar los nuevos conceptos a la luz de la intuición que tiene de la descripción continua; y si bien esa referencia puede serle útil en ocasiones, otras veces le genera confusión y le conduce al error. Estamos convencidos, por tanto, que para que el estudiante desarrolle su propia intuición de lo que ocurre cuando se hace uso de una representación discreta del tiempo, es muy importante que posea una herramienta de experimentación. Ese fue el propósito que nos movió a desarrollar el programa 62¹ para PC [1].

Como instrumento de estudio que pretendía ser, el programa se diseñó para que la interfaz con el usuario fuese lo más amistosa posible. El estudiante no tiene que aprender ningún lenguaje de programación por sencillo que sea, sino seleccionar opciones de menús o proporcionar datos numéricos mediante ventanas de diálogo. El programa 62 le permitirá generar secuencias, editar los valores de sus muestras, realizar tratamiento numérico de las mismas, análisis espectral, diseñar y analizar sistemas discretos y, si el usuario dispone de la placa EVM con el microprocesador de procesado digital TMS320C30, podrá generar y filtrar señales analógicas, y experimentar en un entorno analógico con sistemas complejos.

En esta comunicación se realiza una descripción general del programa, destacando sus principales características, y se proporcionan ejemplos de utilización del mismo como herramienta de estudio y de prácticas de laboratorio.

2.- Descripción general

62 está estructurado en dos secciones de trabajo: una, a la que se accede al invocar el programa, está dedicada a la GENERACION Y TRATAMIENTO DE SECUENCIAS, y la otra al DISEÑO DE SISTEMAS DISCRETOS. Estas zonas no son independientes; se puede acceder a cada una de ellas desde la otra y comparten datos. Ambas zonas están organizadas en menús, que ofrecen las diversas opciones del programa. La comunicación entre el usuario y el programa se realiza siempre mediante ventanas, ya sean menús o submenús para seleccionar la acción a realizar, ya sean ventanas de diálogo para la introducción de datos.

2.1.-Generación y tratamiento de secuencias

Una secuencia es un conjunto ordenado de números. En 62 de números complejos. Esta característica es muy interesante, ya que permite manipular señales analíticas, equivalentes paso bajo, transformadas discretas de Fourier, etc. sin especiales tratamientos.

¹ El programa recibió el nombre de 62 como acrónimo de SEñales Y Sistemas DiscretOS.

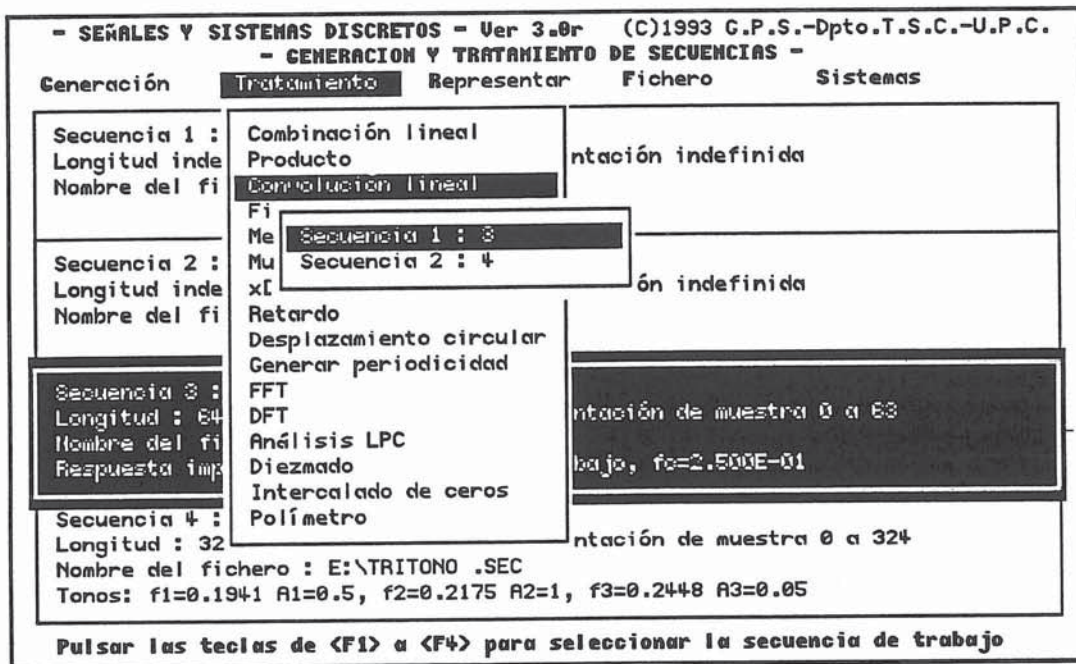


Figura 1.- Ejemplo de presentación de la sección correspondiente a la generación y tratamiento de secuencias (la secuencia 3, en negro, es la secuencia activa).

El programa tiene presente en memoria hasta un máximo de cuatro secuencias, cuya descripción está dispuesta en pantalla permanentemente (salvo cuando se realizan representaciones gráficas). Una de ellas se selecciona como **secuencia activa** y será la entrada a las operaciones que realiza el programa sobre una sola secuencia (edición, filtrado, representación gráfica, edición de comentario, salvar secuencia, etc.); cuando el tratamiento afecta a varias secuencias, éstas son solicitadas por una ventana de diálogo (véase la figura 1). La generación, los tratamientos y la carga de una secuencia se llevan a cabo cuando se selecciona la **secuencia destino**.

Toda secuencia lleva asociada un comentario descriptivo. Este comentario es proporcionado por defecto por el programa, pero también es susceptible de ser introducido por el usuario. Este comentario permanece en pantalla como parte de la información correspondiente a una secuencia. La **longitud máxima** permitida para una secuencia es de 1024 muestras, estando el ordinal limitado entre -512 y 511. Una secuencia puede ser guardada en un fichero en disco. El nombre del fichero debe ajustarse a las convenciones del sistema operativo y forma parte de la información sobre la secuencia que se presenta en pantalla cuando ésta se encuentra en memoria del programa. El programa conserva un **Directorio** de las secuencias.

Los menús disponibles son Generación, Tratamiento, Representar y Fichero.

El menú **Generación** permite la creación de las secuencias más utilizadas en el estudio teórico (impulso, escalón, exponenciales complejas, sinusoides amortiguadas, proceso aleatorio blanco gaussiano, etc.), de las respuestas impulsionales correspondientes a filtros ideales, de las ventanas más usuales y, como ejemplo de señales reales, de segmentos de voz. Adicionalmente, proporciona una opción para la edición de secuencias, que facilita la creación de secuencias arbitrarias a partir del valor de sus muestras, o la modificación de secuencias preexistentes.

En **Tratamiento** se dispone de las operaciones habituales con secuencias: combinación lineal, producto, convolución lineal, filtrado por el sistema disponible en la zona de diseño de sistemas discretos, $x[-n]$, retardo, desplazamiento circular, generación de secuencias periódicas, DFT, FFT, análisis LPC, diezmado, intercalado de ceros (operación previa al filtrado de interpolación), polímetro (cálculo de media, energía y potencia media) y operaciones que se realizan muestra a muestra (exponenciación, logaritmo, parte real, módulo, cuadrado, inversión, cuantización, etc.).

El menú **Representar** ofrece las opciones para la representación gráfica de partes real e imaginaria de una secuencia y del módulo y la fase, así como la definición del entorno gráfico de trabajo.

Por último el menú **Fichero** dispone de las operaciones de entrada y salida del programa: lectura de un fichero con una secuencia, almacenamiento de una secuencia en un fichero,

mantenimiento del directorio de secuencias, impresión de una secuencia y salida de 62. Adicionalmente, ofrece un interface con la placa EVM: la conversión D/A de la secuencia activa, de las cuatro disponibles en memoria, mediante un bucle infinito de modo que tras la última muestra de la secuencia seguirá la primera; en otras palabras, se genera una señal periódica cuyo periodo se corresponde con la secuencia elegida; la frecuencia de muestreo F_m y la frecuencia de corte F_c del filtro reconstructor son especificadas por el usuario.

2.2.- Diseño de sistemas discretos

La sección dedicada al manejo de sistemas (véase la figura 2) se halla organizada del siguiente modo: las operaciones de entrada y salida se encuentran en el menú **Fichero**, el análisis de la respuesta frecuencial, de la respuesta impulsional y el diagrama de ceros y polos en el menú **Gráficas** y la especificación de un sistema en **Datos**, juntamente con Tipo y Aproximación. El orden máximo permitido para un sistema es 32. Esta zona de trabajo dispone de dos modos de funcionamiento, "Especificaciones" y "Función de transferencia", que se distinguen por la forma en que se define el sistema en el menú de Datos.

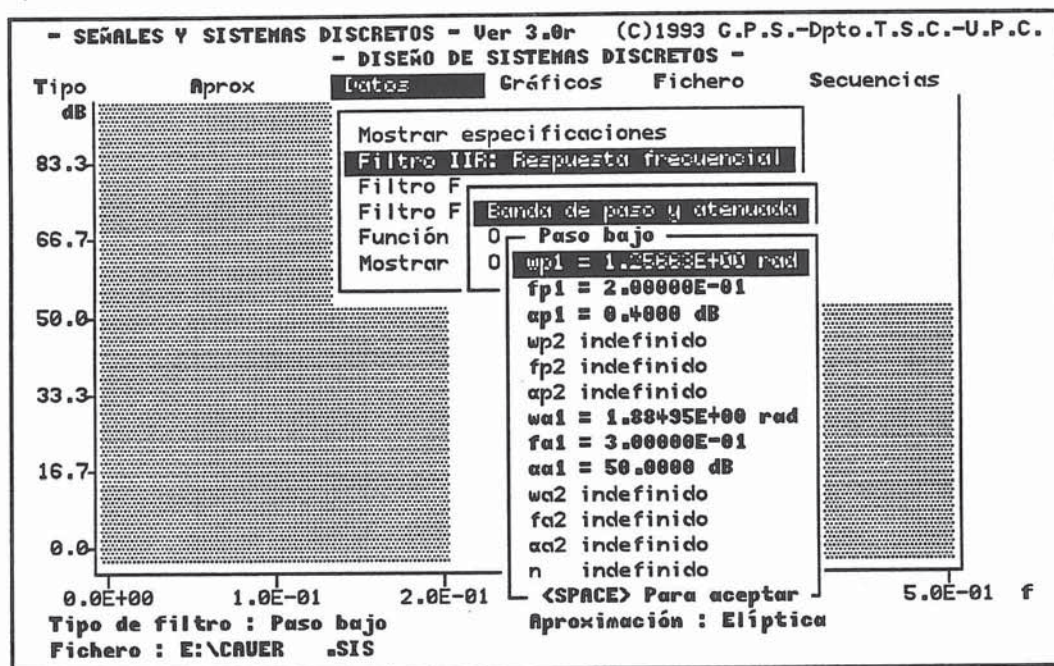


Figura 2.-Ejemplo de presentación de la sección correspondiente al diseño de sistemas discretos.

En el modo **Especificaciones**, se pueden diseñar filtros IIR paso bajo, paso alto, banda eliminada y paso banda por transformación bilineal de prototipos analógicos de Butterworth, Chebychev, inversa de Chebychev y elípticos. También se pueden obtener sistemas FIR óptimos [2] con las configuraciones frecuenciales anteriores, además de filtros multibanda, derivadores y transformadores de Hilbert. Por último, se incluye la posibilidad de generar un sistema FIR cuya respuesta impulsional sea una de las cuatro secuencias residentes en memoria; esto permite el diseño de filtros por la técnica de ventanas o el muestreo en frecuencia.

En el modo **Función de transferencia** se dispone de una herramienta que permite editar los ceros y los polos de la $H(z)$ de un sistema, así como los coeficientes de numerador y denominador. Ello facilita la modificación de un diseño preexistente o la creación de uno nuevo. También están contempladas la posibilidad de obtener el sistema inverso y las combinaciones cascada y paralelo de sistemas.

En el menú **Fichero**, además de las operaciones de entrada y salida, se incluyen tres interfaces con la placa EVM. **Test de filtrado** permite comprobar el correcto funcionamiento de la placa y realiza la opción Filtrado analógico con el sistema cuya relación entrada salida es $y[n] = x[n]$. **Filtrado analógico** traslada el sistema en memoria del programa a la placa EVM, para que ésta realice en tiempo real el filtrado de una señal analógica adquirida con el conversor A/D y produzca la conversión D/A del resultado; es decir, la placa emula el filtrado analógico. El usuario elige la

frecuencia de muestreo F_m y la frecuencia de corte F_c de los filtros antialiasing y reconstructor. Demostraciones ofrece la ejecución en la placa EVM de un programa de demostración de entre seis disponibles; esta opción permite experimentar con el funcionamiento en tiempo real de sistemas complejos, tales como sistemas de codificación de voz, encriptado, modulación, multiplexión, generación de ecos y un largo etcétera; los sistemas demostrativos (cuyos parámetros el estudiante puede diseñar) proporcionan ejemplos concretos y comprensibles de algunas de las posibilidades del tratamiento digital de la señal.

3.- Ejercicios didácticos

A fin de ilustrar las posibilidades que el programa 62 ofrece como herramienta didáctica, se proporcionan a continuación la versión abreviada de tres ejercicios propuestos a los estudiantes de la asignatura "Señales y sistemas II" del plan 92 de la E.T.S.I. de Telecomunicación de Barcelona [3].

3.1.- Ejercicio I

Cuando un sistema es lineal e invariante con el tiempo, su relación entrada-salida puede ser establecida en términos de su respuesta $h[n]$ al impulso unidad mediante la convolución lineal:

$$y[n] = x[n] * h[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] h[n-k] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[n-k] h[k]$$

- 1.- Considere el sistema definido por la relación entrada-salida:

$$y[n] = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x[n-k]$$

- Este sistema realiza el promedio de M muestras de la secuencia de entrada. Determine su respuesta impulsional.
- 2.- Haciendo uso de la convolución lineal, calcule gráficamente la respuesta del sistema anterior al pulso rectangular de longitud L :

$$p[n] = \begin{cases} 1 & 0 \leq n \leq L-1 \\ 0 & \text{para otro } n \end{cases}$$

- en los supuestos $M \leq L$ y $M > L$.
- 3.- Si el sistema promediador es alimentado por una onda cuadrada de periodo $2L$:

$$c[n] = \sum_{r=-\infty}^{\infty} p[n+r(2L)]$$

- obtenga la respuesta en los supuestos $M \leq L$ y $M > L$ (trabaje con valores concretos para M y L).
- 4.- Mediante la opción "Editar secuencia" de 62 genere la respuesta impulsional del sistema Promediador con $M=8$ y compruebe sus soluciones a las dos cuestiones anteriores.
- 5.- Se desea hacer uso del sistema promediador para filtrar una onda cuadrada analógica. Para ello, a partir de la respuesta impulsional editada en el apartado anterior, construya el correspondiente sistema mediante la opción "Filtro FIR: Respuesta impulsional" del menú "Datos" de Sistemas; y, por medio de la opción "Filtrado analógico" con $F_m=8$ kHz y $F_c=3.6$ kHz, filtre una señal cuadrada. Varíe la frecuencia de esta onda cuadrada, observe la respuesta del sistema en el osciloscopio y justifique los resultados obtenidos para las frecuencias 250 Hz, 500 Hz y 1 kHz.

3.2.- Ejercicio II

- 1.- Proceda al análisis de un segmento de voz. Elija en el submenú de "Señales" de Generación la opción "Segmento de voz"; tome, por ejemplo, el segmento 3 desde la muestra 1 con una longitud de 512 muestras. Represente la señal; observará que una parte de la señal corresponde a un sonido sordo y otro a un sonido sonoro. Trate de determinar el periodo del sonido sonoro; para ello seleccione en "Límites" el margen de ordinales que le resulte más cómodo.
- 2.- En el procesado de señal la forma más común de determinar el periodo de una señal es hacer uso de la autocorrelación de la misma. Calcule la autocorrelación de la secuencia anterior y representela. ¿Cuál es el periodo de la señal? Justifique su respuesta y relaciónelo con el obtenido anteriormente.

- 3.- Genere una señal que contenga un solo periodo del sonido sonoro; por ejemplo, de la muestra 376 en adelante. Calcule su DFT y represente su módulo. ¿A qué frecuencias presenta el sonido los dos formantes más marcados?
- 4.- Proceda ahora a obtener el modelo del tracto vocal correspondiente al segmento de voz que está analizando. Calcule la autocorrelación del periodo seleccionado en el apartado anterior. La opción "Análisis LPC" del menú "Tratamiento" le proporciona una secuencia con los coeficientes del denominador del sistema recurrente que modeliza el tracto vocal. Elija orden 8, por ejemplo. Pase a Sistemas y en el menú "Datos" tome la opción "Filtro FIR: Respuesta impulsional": así genera un sistema $A(z)$ cuya respuesta impulsional está constituida por los coeficientes calculados anteriormente:

$$A(z) = 1 - \sum_{i=1}^P a_i z^{-i}$$

La acción anterior le deja en el menú "Función de transferencia"; seleccione la opción "Sistema inverso": así alcanza el modelo que buscaba. Represente el módulo de su respuesta frecuencial y compárela con la transformada de Fourier del periodo sonoro calculada en el apartado 3. ¿Coinciden las posiciones de los formantes más significativos?

- 5.- Es el momento de sintetizar voz:
 - a) Obtenga la respuesta impulsional del modelo de tracto vocal.
 - b) Genere a partir de ella un sonido sonoro con un tono de 100 Hz. Ello puede hacerse con la opción "Generar periodicidad" del menú "Tratamiento".
 - c) Sintetice y escuche mediante los auriculares el sonido generado. Para ello haga uso de la opción "Conversión D/A" del menú "Fichero" con una frecuencia de muestreo de 8 kHz y una frecuencia de corte para el filtro reconstructor de 3.6 kHz.
- 6.- Si repite los pasos seguidos en la experiencia 5 pero tomando distintos periodos en "Generar periodicidad", podrá sintetizar el mismo sonido (una i) con notas fundamentales distintas. Hágalo, por ejemplo, para tonos de 60 Hz y 200 Hz aproximadamente.

3.3.- Ejercicio III

Es práctica habitual en comunicaciones que varias señales compartan el mismo medio de transmisión; ejemplos típicos son la radiodifusión (múltiples estaciones emisoras se difunden a través de la atmósfera) y la telefonía (el mismo cable porta cientos de conversaciones simultáneamente). Esta práctica recibe el nombre de **multiplexión** y la operación de separar las señales se denomina **demultiplexión**. Para que las distintas señales no se interfieran entre sí (o puedan ser recuperadas sin contaminación de las demás) es preciso prepararlas antes de juntarlas en el medio de transmisión común. Una alternativa es situar cada señal en una banda distinta del espectro; esta técnica recibe el nombre de **multiplexión por división en frecuencia (FDM)**.

El diezmado y la interpolación son imprescindibles cuando la multiplexión o la demultiplexión en frecuencia se realiza mediante procesamiento de señal a tiempo discreto. En la figura 3 se muestra el esquema de un multiplexor de dos señales paso bajo, que suponemos han sido muestreadas sin aliasing. La primera señal es interpolada por un filtro H_1 paso bajo; la segunda es interpolada paso alto con el filtro H_2 ; finalmente, ambas señales son sumadas para generar la secuencia $s[n]$, compuesta por ambos canales. La respuesta impulsional $h_2[n]$ del filtro H_2 se toma en función de la respuesta impulsional $h_1[n]$ de H_1 como $h_2[n] = (-1)^n h_1[n]$.

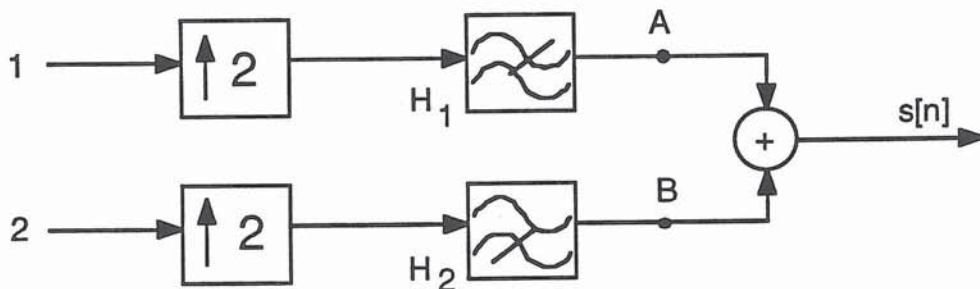


Figura 3.- Multiplexor de dos canales

Si en el extremo de recepción la señal multiplexada es convertida A/D, la demultiplexión puede realizarse mediante diezmado, tal como se representa en la figura 4. La señal compuesta es filtrada y diezmada; la señal del canal 1 se recupera mediante un filtrado paso bajo, mientras que la señal del canal 2 se demultiplexa por un filtro paso alto.

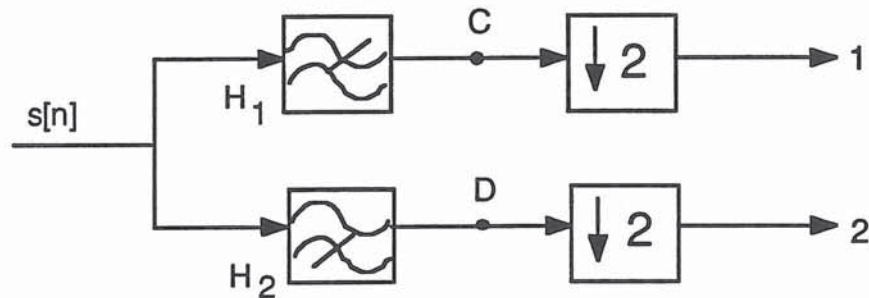


Figura 4.- Demultiplexor de dos canales.

Para poder experimentar en el laboratorio con los sistemas multiplexor y demultiplexor anteriores, éstos han sido programados en la demostración 3 del programa 62 (disponible en el submenú "Demostraciones" del menú "Fichero" de Sistemas). Cuando se invoca esta "Demo 3", se carga en la placa EVM un programa que ofrece diversas opciones de operación; el modo de trabajo se selecciona mediante un menú que se muestra en la pantalla del PC. Las opciones posibles y la acción que realizan son las siguientes:

- 1.- **Seleccionar filtro:** solicita el nombre del fichero que contiene el filtro H_1 ; cuando se responde <RETURN>, se toma como respuesta impulsional del filtro $h_1[n]=\delta[n]$. Esta opción permite especificar el filtro a utilizar en cualquiera de los modos de trabajo siguientes.
- 2.- **Interpolador por 2:** adquiere la señal presente en el convertidor A/D con una frecuencia de muestreo de 8 kHz, la interpola mediante H_1 por 2 y la convierte D/A con una frecuencia de 16 kHz. Esta es la opción que se selecciona por defecto al llamar a la demostración; en dicho momento el filtro H_1 es $h_1[n]=\delta[n]$.
- 3.- **Multiplexor:** adquiere la señal presente en el convertidor A/D con una frecuencia de muestreo de 8 kHz y la multiplexa (canal 1), de acuerdo con el esquema de la figura 1, con una señal de datos (canal 2), constituida por un tono cuya frecuencia alterna aleatoriamente entre 1 y 3 kHz; finalmente, la señal compuesta es llevada al convertidor D/A, que trabaja con una frecuencia de 16 kHz.
- 4.- **Demultiplexor (canal 1):** adquiere la señal presente en el convertidor A/D con una frecuencia de muestreo de 16 kHz, recupera la señal del canal 1 y la pasa al convertidor D/A que trabaja con una frecuencia de 8 kHz. Esta opción realiza un filtrado paso bajo mediante H_1 y un diezmado por 2.
- 5.- **Demultiplexor (canal 2):** adquiere la señal presente en el convertidor A/D con una frecuencia de muestreo de 16 kHz, recupera la señal del canal 2 y la pasa al convertidor D/A que trabaja con una frecuencia de 8 kHz. Esta opción realiza un filtrado paso alto mediante H_2 y un diezmado por 2.
- 6.- **Multiplexor + Demultiplexor (canal 1):** combina los modos 3 y 4; sin embargo, en este caso la señal compuesta $s[n]$ es llevada al demultiplexor sin ser convertida a señal analógica. Los convertidores A/D y D/A trabajan a 8 kHz.
- 7.- **Multiplexor + Demultiplexor (canal 2):** combina los modos 3 y 5; sin embargo, en este caso la señal compuesta $s[n]$ es llevada al demultiplexor sin ser convertida a señal analógica. Los convertidores A/D y D/A trabajan a 8 kHz.
- 8.- **Salir:** permite dejar la demostración y retornar a 62.

En todo momento la opción activa es indicada mediante un asterisco a la izquierda del número de orden.

- 1.- Sean y_0, y_1, y_2 e y_3 cuatro valores de una función correspondientes a valores equiespaciados x_0, x_1, x_2 y x_3 de la variable. La fórmula de interpolación cúbica de Lagrange proporciona el siguiente valor y para la función en el punto medio entre x_1 y x_2 :

$$y = -\frac{1}{16} y_0 + \frac{9}{16} y_1 + \frac{9}{16} y_2 - \frac{1}{16} y_3$$

- A partir de esta información, proponga la respuesta impulsional para un filtro interpolador por 2.
- 2.- Mediante la opción "Editar secuencia" del menú "Generación" escriba la respuesta impulsional del interpolador (Lagrange) diseñado en el apartado 1. Construya el sistema FIR correspondiente con la opción "Filtro FIR: respuesta impulsional". Analice su respuesta frecuencial y estime la banda de frecuencias en la que se comportará adecuadamente como interpolador. Invoque la "Demo 3", que comenzará actuando como interpolador, y seleccione el interpolador Lagrange como filtro; introduzca en el convertidor A/D un tono y varíe su frecuencia, comprobando la banda de frecuencias en el que se obtiene una interpolación correcta.
 - 3.- El interpolador anterior sólo interpola correctamente señales de muy baja frecuencia. Se le pide ahora el diseño de un filtro FIR paso bajo para interpolar por 2 una señal telefónica, que supondremos con componentes entre 300 Hz y 3.2 kHz y muestreada a 8 kHz. Realice el diseño óptimo (Parks) de modo que se consiga una atenuación de 50 dB en la banda atenuada y la máxima diferencia entre la respuesta del filtro a dos componentes frecuenciales en la banda de paso no sea superior al 5% del valor nominal unidad.
 - 4.- Compruebe su funcionamiento como interpolador y compárelo con el anterior.
 - 5.- Seleccione la opción 4, que realiza un diezmado por 2, invoque la opción Seleccionar filtro y conteste con <RETURN> (ahora la demostración trabaja con el filtro $h_1[n]=\delta[n]$). Alimente el convertidor A/D con un senoide y observe la salida obtenida en el convertidor D/A; justifique el resultado. Haga una excursión en frecuencia (por ejemplo, de 1 a 7 kHz); consigne y explique el efecto observado.
 - 6.- Póngase de acuerdo con sus compañeros de un puesto de trabajo vecino; en un puesto elijan la opción Multiplexor y en el otro el modo Demultiplexor (canal 1). Tome señal para el canal 1 de un receptor de radio y seleccione el filtro de Lagrange. Escuche y observe en el osciloscopio la señal del canal 1. Cambie al filtro Parks; anote y justifique el cambio de comportamiento advertido.
 - 7.- Demultiplexe el canal 2; escuche y observe la señal de dicho canal, cambiando el nivel de la señal de entrada al canal 1. Cambie al filtro Lagrange; tome nota y explique del cambio de comportamiento advertido.

4.- Conclusión

El programa 62 ha sido experimentado como herramienta de prácticas de laboratorio durante los dos últimos cursos académicos. El puesto de trabajo disponía de un PC 386 con procesador aritmético, 1 Mbyte de memoria, la placa EVM, conectado a un servidor Novell y sin disco; además, el puesto de trabajo incluía un generador de funciones, un osciloscopio de baja frecuencia y una caja de conexión para los conversores A/D y D/A. La opinión recogida de los estudiantes es muy positiva, destacando su convencimiento de que las actividades de laboratorio han resultado de gran ayuda para el estudio y comprensión de los conceptos teóricos. El programa se distribuyó gratuitamente a los estudiantes para que pudiesen hacer uso de él en su estudio.

Como consecuencia del éxito de la experiencia, surgió el interés de redactar un libro que ofreciese la posibilidad de realizar el estudio del tratamiento digital de la señal con el apoyo de un instrumento de experimentación. El proyecto está financiado por la Universidad Politécnica de Cataluña y se publicará el próximo curso 1994-95. El texto [4] consta de un manual de estudio en el que se expone la teoría integrada con ejercicios a realizar con 62, y un manual de laboratorio con el enunciado de 6 prácticas, todas ellas precedidas de un estudio previo a la sesión de laboratorio. El libro incluye una copia del ejecutable del programa 62 y el manual de usuario del mismo.

Referencias:

- [1] F. Vallverdú, J. B. Mariño, L. Ubeda, "Educational Discrete-Time Signal Processing Tool EDTSPT" Proc. The International Conference on Signal Processing Applications and Technology, pp. 298-307, Boston (noviembre 1992).
- [2] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, "Discrete-time Signal Processing" Prentice Hall, 1989.
- [3] J. B. Mariño, J. A. Rodríguez, F. Vallverdú, "Señales y sistemas II: manual de prácticas" CPET, Barcelona 1994.
- [4] J. B. Mariño, F. Vallverdú, J. A. Rodríguez, A. Moreno, "Tratamiento digital de la señal: una introducción experimental", Ediciones UPC.