

## Analizador Multicanal con interfaz USB para aplicaciones con detectores de centelleo

Oscar Baltuano<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> Dirección de Investigación y Desarrollo, Instituto Peruano de Energía Nuclear,  
Av. Canadá 1470, Lima 41, Perú

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos,  
Av. Universitaria/Av. Amézaga S/N, Lima 1, Perú

### Resumen

Se ha realizado la conexión de un módulo convertidor análogo digital (ADC) tipo Wilkinson a una PC a través de una interfaz USB. Este ADC fue diseñado en los años noventa como etapa de entrada de un analizador multicanal (MCA) y se construyó para realizar espectrometría con detectores de centelleo con fuentes de baja actividad. A este módulo se le ha conectado una interfaz USB que junto con un programa de control en la PC permite convertirlo en un MCA de hasta 2048 canales. Se han obtenido resultados muy buenos con espectros de Cs-137 y Co-60 usando un detector de NaI(Tl). La resolución y la linealidad integral del MCA han mostrado ser adecuada, por lo cual puede ser utilizado en cualquier aplicación que no requiera mediciones de altas tasas de conteo.

### Abstract

A connection of an analog-digital converter (ADC) module, type Wilkinson was made to a PC through a USB interface. The ADC was designed, in the nineties, as the input stage of a multichannel analyzer (MCA) intended to be used with scintillation detectors and low activity sources. Together with a program on the PC, the USB interface was connected to the ADC for achieving 2048 channels MCA. The results of the Cs-137 and Co-60 spectra using a NaI(Tl) detector were excellent. MCA resolution and integral linearity obtained from the device is adequate, therefore it can be use in any application that requires no measuring high counting rates.

### 1. Introducción

La instrumentación requerida en aplicaciones nucleares, en general, debe cumplir con ciertas exigencias específicas de funcionamiento, lo cual encarece el costo de estos equipos.

Algunas de estas aplicaciones como en el caso de los detectores de centello o aquellas que implican bajas tasas de conteo, permiten flexibilizar los requerimientos y por tanto facilitar el diseño y reducir el costo. Un ejemplo de esto, son los equipos utilizados para enseñanza y que utilizan fuentes radioactivas patrón de muy baja actividad.

De todos los instrumentos requeridos en experimentos nucleares, los analizadores multicanal (MCA) operando en modo PHA (Pulse High Analyzer) son los más complejos y costosos. Sin embargo, gracias al desarrollo de la tecnología actual se cuenta con dispositivos electrónicos muy potentes a costos muy bajos sumado a la potencia de cálculo de las PC's actuales, se abren nuevas

posibilidades de diseño, desarrollo e innovación en el campo de la instrumentación nuclear.

### 2. Antecedentes

A mediados de los años 90, como parte de un proyecto para la construcción de un Sistema Multisonda para Aplicaciones con Radiotrazadores se desarrolló toda la instrumentación nuclear requerida [1], la cual se dividía en forma de módulos independientes, los cuales eran controlados por una computadora personal, a través de una tarjeta plug-in ISA que se insertaba en un slot de la PC.

De todos estos módulos, era de especial importancia y complejidad el MCA, que estaba constituido un por convertidor análogo-digital o ADC (Analog/Digital Converter) tipo Wilkinson [2] y la lógica de control y almacenamiento.

---

\* Correspondencia autor: obaltuano@ipen.gob.pe

En un inicio las computadoras personales no tenían la capacidad de cálculo y la velocidad de comunicación de las actuales, por lo cual, la lógica de control y almacenamiento era realizada por medio de circuitos digitales externos a la computadora.

Hoy en día, una PC estándar puede realizar perfectamente todas las tareas digitales asociadas a un MCA siempre que el ADC le transfiera la información relacionada con la altura de los pulsos nucleares.

Un pequeño microcontrolador conteniendo una interfaz USB puede entonces, recibir la información digital del ADC y transferirla a una PC, la cual equipada con el programa de control y comunicación correspondiente podrá realizar el almacenamiento de los datos y luego construir espectro de energías de la radiación detectada.

### 3. Materiales y equipos

#### 3.1 Convertidor Análogo-Digital (ADC)

Existen diversos tipos de ADC para la conversión de señales analógicas de pulsos nucleares en señales digitales. Los más utilizados para estas aplicaciones son los de aproximaciones sucesivas con corrección escala deslizante y los de tipo Wilkinson [2]. Este último es comparativamente el más lento de todos, pero sus características lo hacen ideal para la conversión de pulsos nucleares.

El ADC se diseñó de tipo Wilkinson, teniendo en cuenta que sería utilizado para mediciones de baja actividad; en las cuales el tiempo muerto al ser pequeño permite que el tiempo de conversión del ADC no sea tan crítico. A esto se suma la excelente linealidad integral y diferencial de estos convertidores que a pesar de su lentitud siguen siendo ampliamente utilizados en aplicaciones nucleares [3].

La Figura 1 muestra el diagrama de bloques simplificado del ADC utilizado. Se trata de un circuito detector de pico o memoria analógica formada por U1, D1, C y U2, la cual es controlada mediante la fuente de corriente I. Cuando esta fuente de corriente está activa, el condensador C sigue las variaciones de tensión en la entrada del circuito. Cuando I es desactivada, el condensador almacenará el valor máximo del pulso de entrada al no poder descargarse

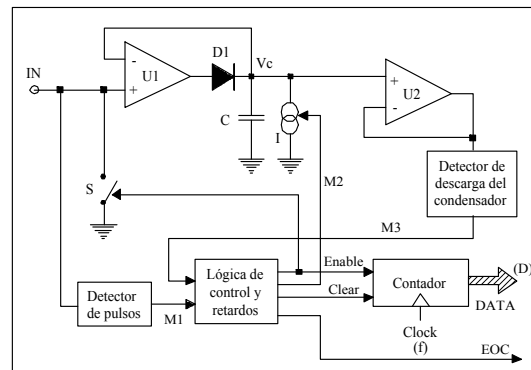
debido al bloqueo producido por el diodo D1 y la altísima impedancia que presentan la fuente de corriente y U2. El comportamiento del condensador viene dado por:

$$I = C \frac{\partial V}{\partial t}$$

Sin embargo, debido a que I es constante durante la descarga, la expresión anterior puede integrarse para obtener:

$$t = \left(\frac{C}{I}\right)V$$

Se observa que el tiempo de descarga del condensador será una función lineal del nivel de tensión V almacenada en él, es decir, el tiempo que demore en descargarse el condensador dependerá linealmente de la altura del pulso a la entrada (Figura 2).



**Figura 1.** Diagrama de bloques simplificado del convertidor A/D tipo Wilkinson.

Este tipo de funcionamiento requiere que el detector de pico solo esté activo durante la aparición de un pulso nuclear. Por ello que se adiciona el detector de pulsos que produce una señal digital ante la aparición de un pulso nuclear. La lógica de control, es disparada por esta señal y desactiva la fuente de corriente I durante un tiempo suficientemente grande (lógica de retardo) como para garantizar que el pico del pulso ha ocurrido. Posteriormente, al activarse la fuente de corriente, se inicia la descarga del condensador C y simultáneamente se inhabilita la entrada de pulsos mediante el interruptor S, para evitar que la llegada de otro pulso altere el valor almacenado en C. El detector de umbral inferior indica cuando el condensador se encuentra totalmente descargado con lo que se finaliza el proceso.

De esta manera, el contador habrá almacenado una palabra digital (D) que vendrá dada por la expresión:

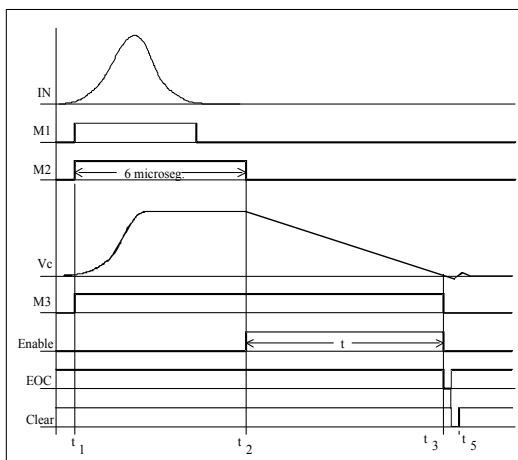
$$D = f \cdot t = f \left( \frac{C}{I} \right) V$$

Donde  $f$  es la frecuencia de reloj utilizada en el contador y el valor de  $I$  dependerá exclusivamente del tipo de fuente de corriente y de los valores de diseño de la misma.

La señal EOC (End of Convert) indica la terminación del proceso de conversión por lo que puede ser utilizada para transferir la palabra digital (D) a un registro de almacenamiento adecuado o en este caso a un microcontrolador.

El bloque del contador está formado por 3 contadores binarios de 4 bits, interconectados en forma síncrona, con lo cual se obtiene un único contador de 12 bits (con un máximo de 4096 canales), el cual puede ser habilitado o deshabilitado al controlar la señal Enable.

La lógica de control y generación de retardos es el corazón del convertidor A/D, está formada por un conjunto de CI's encargados de producir la secuencia correcta según se muestra en la Figura 2. Mayores detalles de su funcionamiento pueden encontrarse en [1].



**Figura 2.** Diagrama de tiempos de la lógica de funcionamiento del convertidor A/D.

En condiciones normales, cuando no hay ningún pulso nuclear en la entrada (previo a  $t_1$ ), la fuente de corriente  $I$  se encuentra activa debido a que  $M_2$  está en bajo, por lo que el condensador  $C$  se encuentra totalmente

descargado. Ante la aparición de un pulso nuclear en  $t_1$ , el detector de pulsos dispara la señal  $M_1$  para activar un monoestable por un tiempo aproximado de 6  $\mu$ segundos ( $M_2$ ), la fuente de corriente es inhabilitada y la memoria analógica configurada como detector de pico entra en funcionamiento ( $V_c$ ). Transcurridos los 6  $\mu$ segundos, tiempo en el cual el pulso ya ha alcanzado su máximo, nuevamente se activa la fuente de corriente para iniciar la descarga lineal del condensador (instante  $t_2$ ) y habilitar el contador de 12 bits (Enable). Con estas mismas señales, y para evitar que la llegada de otro pulso altere la descarga del condensador, se coloca a tierra la entrada de  $U_1$  por medio del transistor y se deshabilita el disparo del monoestable.

Cuando  $C$  se encuentra ya descargado, la señal  $M_3$  cae a cero, con lo que se deshabilita el contador y regresan todos los circuitos a su estado inicial para un nuevo proceso de conversión. Con esta misma señal se generan dos pulsos consecutivos, uno para indicar el fin de la conversión (EOC) y el otro para hacer la limpieza del contador (Clear) y dejarlo listo para una nueva conversión.

El valor de la corriente  $I$ , viene determinado por el tipo de circuito utilizado según la expresión:

$$I = \frac{VZ - 0,8}{R}$$

Donde  $VZ$  es el voltaje de referencia interno y  $R$  la resistencia asociada a la fuente de corriente. Con ello, la palabra digital (D) correspondiente a la conversión vendrá dada por:

$$D = f \cdot t_c = f \cdot \left( \frac{R \cdot C}{VZ - 0,8} \right) \cdot V$$

Se han utilizado los siguientes valores:  $VZ = 6.2V$ ,  $f = 4MHz$  y  $C = 5 nF$ . Teniendo en cuenta que los pulsos nucleares están normalizados entre 0 y 10V, un valor de  $V = 10V$  deberá dar el valor máximo  $D$  según el número de canales que se desea. Un grupo de tres jumper switch en el ADC permiten seleccionar diferentes valores de  $R$  en función del número de canales:

2048 canales ( $D=2048$ ),  $R \approx 55.2K$   
 1024 canales ( $D=1024$ ),  $R \approx 27.6K$   
 512 canales ( $D= 512$ ),  $R \approx 13.8K$

Trimpots multivoltas permiten hacer un ajuste fino de estos valores para realizar la calibración electrónica de cada una de las escalas del ADC. Considerando que el ADC será utilizado con detectores de centelleo, los cuales intrínsecamente poseen baja resolución, un máximo de 2048 canales (11 bits) es suficiente.

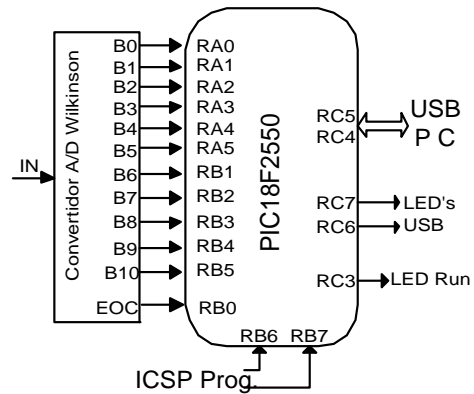
Se puede calcular, por ejemplo, con las ecuaciones anteriores que el tiempo de descarga ( $t_c$ ) de un pulso de 10V, para 1024 canales, es de 51.2  $\mu$ segundos. A este valor se debe agregar el tiempo requerido para el muestreo y retención del detector de pico (6  $\mu$ segundos) y los tiempos adicionales para la sincronización. Considerando estos valores se ha estimado un tiempo máximo de conversión de 60  $\mu$ segundos. (con 1024 canales). Valor que será menor dependiendo de la altura del pulso que es convertido.

### 3.2 La interfaz USB

La interfaz entre el ADC y la PC se realizó a través de un microcontrolador ( $\mu$ C) PIC18F2550 [4] el cual posee un módulo USB 2.0 y 23 líneas de E/S entre otro hardware adicional. Para la interconexión del ADC se requieren 11 líneas correspondientes al valor de conversión digital del pulso nuclear y 1 línea para la señal de fin de conversión (EOC). Las demás líneas son utilizadas: 2 en el puerto USB, 3 para LED's indicadores y 2 para la comunicación ISCP destinada a programar del  $\mu$ C (Figura 3).

El firmware para el microcontrolador se escribió en lenguaje C con el compilador MPLAB C18 [5] el cual está integrado en el entorno de desarrollo MPLAB IDE.

El dispositivo opera a partir de un cristal de 20 MHz, frecuencia que es elevada hasta 48 MHz, mediante un PLL y un divisor de frecuencia, que son necesarios para el funcionamiento del módulo USB. La velocidad del CPU es  $\frac{1}{4}$  de la frecuencia del cristal: 12 MIPS (millones de instrucciones por segundo) [4].



**Figura 3.** Esquema simplificado de la conexión entre el ADC y la PC a través del  $\mu$ C con USB.

La señal EOC del ADC está conectada al pin RB0 del microcontrolador. Este pin genera una interrupción de hardware con cada flanco de bajada de EOC; lo que interrumpe cualquier proceso en el  $\mu$ C con la finalidad de leer la palabra digital (D) de conversión y enviarla directamente al PC a través del USB.

La comunicación entre el  $\mu$ C y la PC se realiza con la especificación CDC (Communications Device Class) de USB [6], esto permite “ver” la conexión desde la PC como un puerto RS-232 de alta velocidad. Este método de comunicación ha sido implementado anteriormente en [7] y ya ha demostrado su utilidad.

Para el firmware en el microcontrolador, se ha utilizado el ejemplo “USB Device - CDC Basic Demo” contenido en la librería “Microchip USB Firmware Framework v.2.3” [8]; el cual ha sido modificado para esta aplicación.

### 3.3 El programa de control

En el lado de la PC se ha desarrollado un programa de control escrito en Fortran 95. Para la comunicación se utilizó la librería SciComm de MicroGlyph [9] que proporciona acceso a la API's de windows para la comunicación serial. También se han utilizado las librerías gráficas de Winteracter para Windows.

El programa, en su concepción más sencilla, recibe uno por uno bloques de 4 bytes enviados por el ADC y que contienen la información de la palabra digital (D) correspondiente a la altura del pulso que ha sido convertido.

Este valor D es usado para direccionar una posición de memoria, dentro de un vector (array), e incrementar en uno el valor almacenado en esa posición. De esta forma, se va construyendo en el array, el histograma acumulativo de las alturas de los pulsos, que a su vez corresponden con la energía de la radiación detectada.

Para evitar perder información por sobrecarga del CPU, la actualización del gráfico en el monitor se realiza únicamente cada segundo.

El programa también envía al  $\mu\text{C}$  los comandos de inicio (Start) y parada (STOP) que habilitan al  $\mu\text{C}$  para aceptar o no los datos recibidos desde el ADC.

Funciones de temporización automática (timer) además de algoritmos de suavizado de espectros mediante convolución entre otras opciones también fueron incluidos dentro del programa de control.

### 3.4 La cadena de instrumentación

El ADC y la interfaz USB fueron probados con una cadena de centelleo para lo cual se utilizó un detector de NaI(Tl) de 2" x 2" marca Ortec Mod. 905-3 y fotomultiplicador/preamplificador Canberra, Mod. 2007P. Además de una fuente de alta tensión Ortec, Mod. 478; un amplificador Canberra, Mod 2015A y un generador de pulsos nucleares marca BNC, mod. PB-5, todos ellos instalados dentro de un portamódulos NIM Ortec Mod. 4001C. Por último, una fuente de alimentación de doble polaridad de 15V marca Trio se utilizó para la operación del módulo ADC. La interfaz USB es alimentada directamente del conector USB de la PC.

## 4. Resultados y Discusión

Se obtuvieron espectros de radiación gamma de fuentes patrón de Cs-137 (Figura 4) y Co-60 (Figura 5) con actividades de 0,7 y 0,9  $\mu\text{Ci}$  respectivamente.

En ambos casos se configuró el ADC para operar con 1024 canales y tiempos de colección de 2000 segundos. El voltaje de operación del detector fue de 600V. Debido al deficiente apantallamiento eléctrico de los equipos, se observó un pequeño nivel de ruido que genera un falso pico en la zona de bajas energías (por debajo del canal 50), por

lo cual ha sido necesario elevar el nivel umbral inferior del detector de pulsos, lo que produce canales con cero cuentas en ese intervalo.

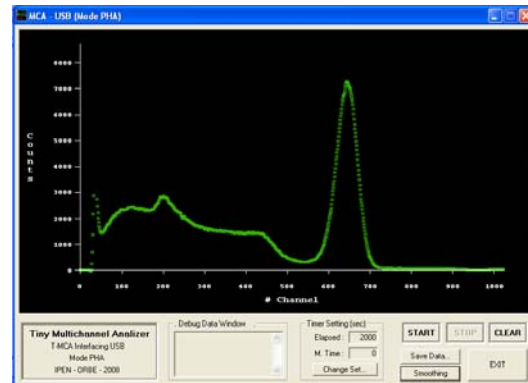


Figura 4. Espectro obtenido de Cs-137.

La resolución obtenida para el fotopico de Cs-137 (Figura 4), posterior a la calibración en energía del espectro fue:

$$Res(\%) = \frac{691.7 - 632.2}{662} \cdot 100 = 8.99\%$$

Valor que se encuentra dentro del esperado para este tipo de detectores cuya resolución intrínseca es entre 8 % y 9 %. El ruido producido por el deficiente apantallamiento eléctrico podría haber producido también una cierta degradación de la resolución total con respecto al valor de resolución intrínseca del detector.

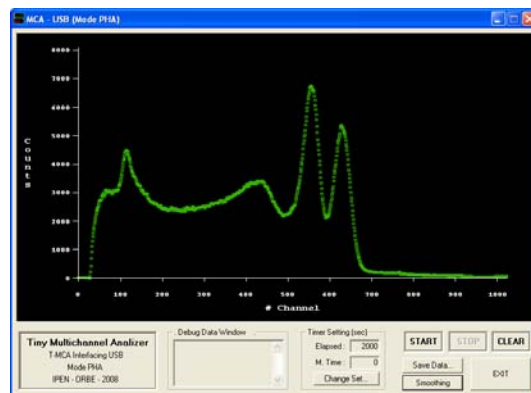
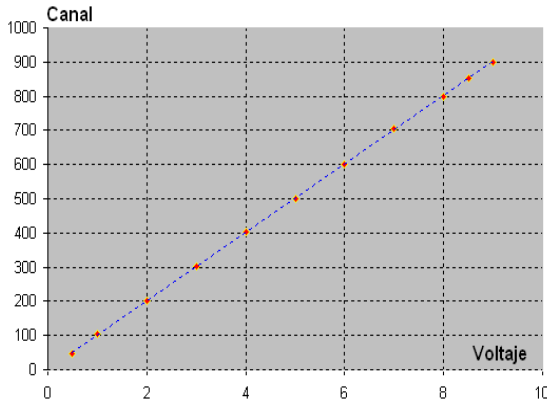


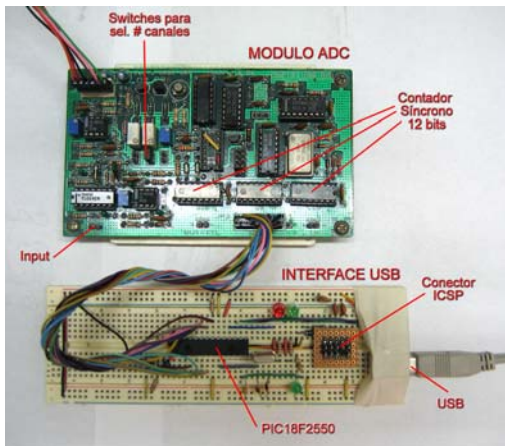
Figura 5. Espectro obtenido de Co-60.

Finalmente, se verificó la linealidad integral del MCA utilizando el generador de pulsos BNC PB-5 a una frecuencia de 2 KHz. La altura de los pulsos fue variada en intervalos de 1 V y en los extremos en intervalos de 0.5 V. Los valores tabulados, de conversión,

correspondientes se muestran en la Figura 6 donde se observa la excelente correlación lineal entre el voltaje de entrada y el valor digital correspondiente entregado por el ADC.



**Figura 6.** Gráfico de linealidad integral. Se observa la buena correlación entre la altura de los pulsos de entrada y el valor de conversión (canal).



**Figura 7.** Imagen mostrando el módulo ADC y la interfaz USB montada sobre un protoboard.

## 5. Conclusiones

La resolución y la linealidad obtenidas satisfacen perfectamente los requerimientos de detectores de centelleo facilitando la implementación de cadenas de espectrometría.

Se ha logrado poner operativo un MCA para aplicaciones con detectores de centelleo, a un costo bastante bajo comparado con los equipos comerciales.

Es posible realizar la modernización de equipos complejos de forma simple y económica a través de interfaces USB, como el caso del MCA descrito, mediante dispositivos electrónicos modernos y realizando gran parte de las funciones requeridas, a través del desarrollo de software.

## 6. Bibliografía

[1] Baltuano O. Sistema de detección y procesamiento de señales originadas por radiación gamma retrodispersada. [Tesis para optar el título de Ingeniero Electrónico]. Lima, Perú: Universidad Ricardo Palma; 1995.

[2] Sinderman J. Curso de instrumentación nuclear. Comisión Nacional de Energía Atómica. Buenos Aires:Argentina; 1990.

[3]International Atomic Energy Agency. Tópicos selectos de electrónica nuclear. IAEA-TECDOC-363. Vienna:Austria; 1988.

[4]Microchip Inc. PIC18F2455/2550/4555 /4550 Data Sheet. 28/40/44-Pin, High Performace, Enhanced Flash, USB Microcontrollers with Nano Watt Technology. USA. 2007.

[5] Microchip Inc. MPLAB C18 C Compiler User's Guide. USA, 2005.

[6] USB Implementers Forum Inc. USB class definitions for communication devices. Version 1.1; 1999.

[7] Baltuano O. Desarrollo de un escalímetro multicanal con conexión USB para monitoreo y registro del flujo de neutrones en los conductos de irradiación del RP-10. Instituto Peruano de Energía Nuclear. Informe Científico y Tecnológico 2008. Lima:Perú [En prensa].

[8] Microchip Inc. Microchip USB Device firmware framework. User's Guide. USA. 2008.

[9]MicroGlyph Systems. SciComm Serial Communication Library Version 7.0. [serie en Internet]. Disponible en: <http://www.microglyph.com/>