

DISEÑO DE UN OSCILOSCOPIO MULTICANAL CON FPGA (PROYECTO LAGO)  
THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF A FPGA MULTI CHANNEL OSCILOSCOPE (LAGO PROJECT)

PEDRO MIRANDA LOZA<sup>1</sup> & FABRICIO G. ÁVILA ELÍAS<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Investigaciones Físicas–UMSA

<sup>2</sup> Carrera de Electrónica, Facultad de Ingeniería–UMSA

RESUMEN

Se diseñaron dos instrumentos basados en FPGA (*Field Programmable Gate Array*) para el proyecto LAGO (*Large Aperture GRB Observatory*) que facilitan la observación de señales eléctricas producidas por variaciones de rayos gamma de alta energía. Estos instrumentos son: osciloscopio de almacenamiento digital básico de alta velocidad con el que se puede observar las variaciones de las señales eléctricas en el tiempo, analizador multicanal que aporta datos cuantitativos acerca de la frecuencia con que las señales eléctricas alcanzan determinados niveles de voltaje. Ambos instrumentos se implementaron en *hardware* digital (re)programable de alta velocidad, utilizando Lenguaje de Descripción de Hardware (HDL). El despliegue y almacenamiento de los datos se realiza por un ordenador que facilita el acceso a funciones de control de los instrumentos. Para esto se desarrolló un *software* propio en visual C++. Se ha verificado el funcionamiento del diseño final conectado a un detector real en el Laboratorio de Física Cósmica en el monte Chacaltaya.

*Descriptor:* sistemas computacionales — instrumentos para rayos gamma

Código(s) PACS: 07.05.Bx, 07.85. –m

ABSTRACT

Two instruments based on FPGA (*Field Programmable Gate Array*) were designed and constructed for the LAGO (*Large Aperture GRB Observatory*) project. The instruments allow the observation of electric signals produced by variations in high energy gamma rays. The instruments developed were: a high velocity basic digital storage oscilloscope which enables the observation of variations in electrical signals over time, a multi channel analyzer that supports quantitative data and picks up on the frequency at which electrical signals reach certain voltages. Both instruments operate with *Language Description Hardware*, a high velocity digital and reprogrammable hardware. The collection and storage of data is performed using a computer that facilitates access to the instruments' control functions. For this purpose original software was developed in C++. The design and function of the instruments were tested by connecting them to a real detector at the Cosmic Physics Laboratory at Chacaltaya, Bolivia.

*Subject headings:* computer systems — gamma ray instruments

1. INTRODUCCIÓN

En los experimentos de física de partículas, las herramientas de adquisición y tratamiento de datos están en constante evolución. Son varios los factores que favorecen esto, desde el aumento de la frecuencia de trabajo de los conversores análogo–digitales hasta la disponibilidad de realizar prototipos basados en FPGA (*Field Programmable Gate Array*), haciendo posible realizar un circuito integrado a medida, sin los riesgos económicos asociados a las otras opciones tecnológicas. Aunque existen módulos especializados, disponibles comercialmente, éstos son de un costo mucho mayor al desarrollo de sistemas específicos.

El diseño de instrumentos de nueva generación con FPGA, está destinado a su utilización en el proyecto LAGO (*Large*

*Aperture GRB Observatory*)<sup>1</sup>, el cual está implementado para la observación de las variaciones de rayos gamma, *Gamma Ray Burst (GRB)*, de alta energía. (Laboratorio de Física Cósmica–Chacaltaya)<sup>2</sup>.

Las señales analógicas producidas por los detectores de rayos cósmicos de alta energía, tienen características especiales tales como: la duración del pulso, el valor máximo de éste, el tiempo promedio entre pulsos; siendo posible estudiar éstas señales mediante un *Osciloscopio* de alta velocidad. También es de interés el número de pulsos que se han producido en un

<sup>1</sup> Proyecto LAGO,

<http://particulas.cnea.gov.ar/experiments/lago>.

<sup>2</sup> Proyecto LAGO–Bolivia,

<http://www.fiumsa.edu.bo/iif/lago/informes>.

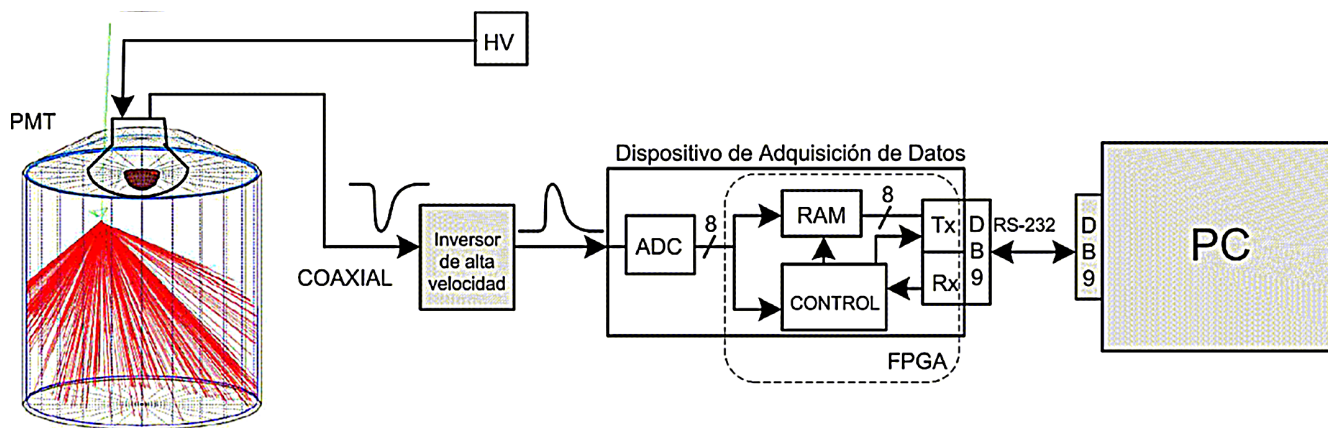


FIG. 1.— Diagrama general de conexiones.

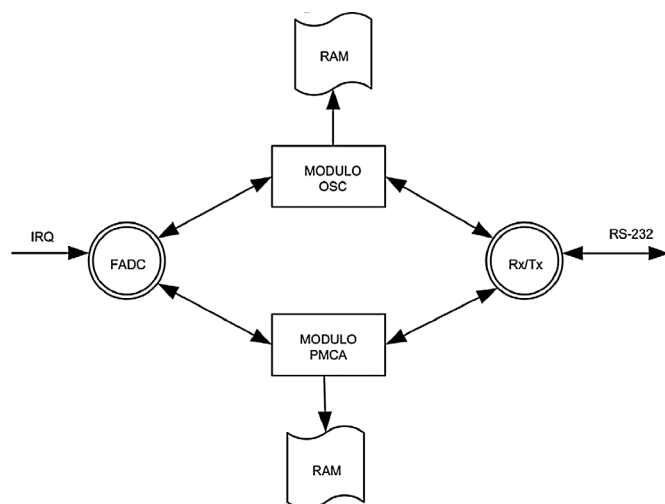


FIG. 2.— Diagrama funcional del diseño general.

intervalo de tiempo; esta tarea es realizada por un *Analizador Multicanal*, el cual tiene el propósito de contar dichos pulsos, además de clasificarlos por amplitudes.

Los detectores de Rayos Cósmicos (RC) del proyecto LAGO entregan una señal eléctrica de corta duración y amplitud proporcional a la energía de la partícula. Para este efecto el detector está formado por las siguientes partes: Detector Cherenkov con agua (*Water Cherenkov Detector-WCD*), fotomultiplicador (PMT) y alimentación de alto voltaje (HV).

Una de las principales características de la tecnología FPGA es la (re)programación del *hardware* digital por el usuario. Por lo que luego es posible diseñar nuevos instrumentos con una inversión mínima. Esto permite que un solo circuito digital en PCB (*Tarjeta de Circuito Impreso*) pueda desempeñar diferentes funciones según lo requiera la ocasión. Por ejemplo, en la implementación de los instrumentos descritos más arriba, podría programarse el hardware como sólo Osciloscopio, o como Osciloscopio y Analizador Multicanal.

La velocidad en la captación y el proceso de datos, hacen del FPGA un dispositivo ideal para el experimento realizado; en vez de realizar la codificación de algoritmos en un micro-

procesador, éstos se mapean directamente en hardware. Esta última característica permite ejecutar instrucciones en paralelo; logrando así que dos instrumentos, Osciloscopio y Analizador Multicanal, procesen datos al mismo tiempo.

El costo económico estimado en la implementación del prototipo, comparado con el costo de una solución comercial es cinco veces menor. Por ello el Instituto de Investigaciones Físicas de la U.M.S.A. creyó que este proyecto se justificaría por su menor costo y aporte a la investigación en física cósmica.

Se elaboraron las GUI's (*Graphic User Interface*) en el ordenador para la visualización de las señales detectadas por los instrumentos. Además de proveer las funciones gráficas, el ordenador provee la mayoría de las funciones de control.

## 2. HARDWARE

En la Fig. 1 se muestra el diagrama general de conexiones entre el Detector, el Inversor de Alta Velocidad, el Dispositivo de Adquisición de Datos y el PC. El Inversor de Alta Velocidad es utilizado para invertir el pulso negativo generado por el Detector, está construido con elementos discretos y tiene un ancho de banda de  $300\text{MHz}$  con una impedancia de entrada de  $1\text{M}\Omega$ .

La señal (negativa) proveniente del Detector (fotomultiplicador), es conducida a través de cable coaxial hasta el Inversor de Alta Velocidad, luego la señal (positiva) de salida del inversor es introducida al Dispositivo de Adquisición de Datos, éste digitaliza las señales analógicas y transmite los datos al PC, a través de una interfaz serial RS-232 con conectores DB9. Para la interfaz serial, es utilizado un cable de nueve hilos no cruzado (tipo módem).

El Dispositivo de Adquisición de Datos está conformado por una tarjeta de digitalización que contiene un conversor análogo-digital de 100 MSPS (*ADC08100-National Instruments*), y una tarjeta de desarrollo con el FPGA ACEX EP1K10TC100 (*Altera*).

Los bloques de la Fig. 1 a implementarse en el FPGA son: la memoria RAM donde se guardarán las muestras, la lógica de control y los módulos de recepción y transmisión de datos del puerto serial.

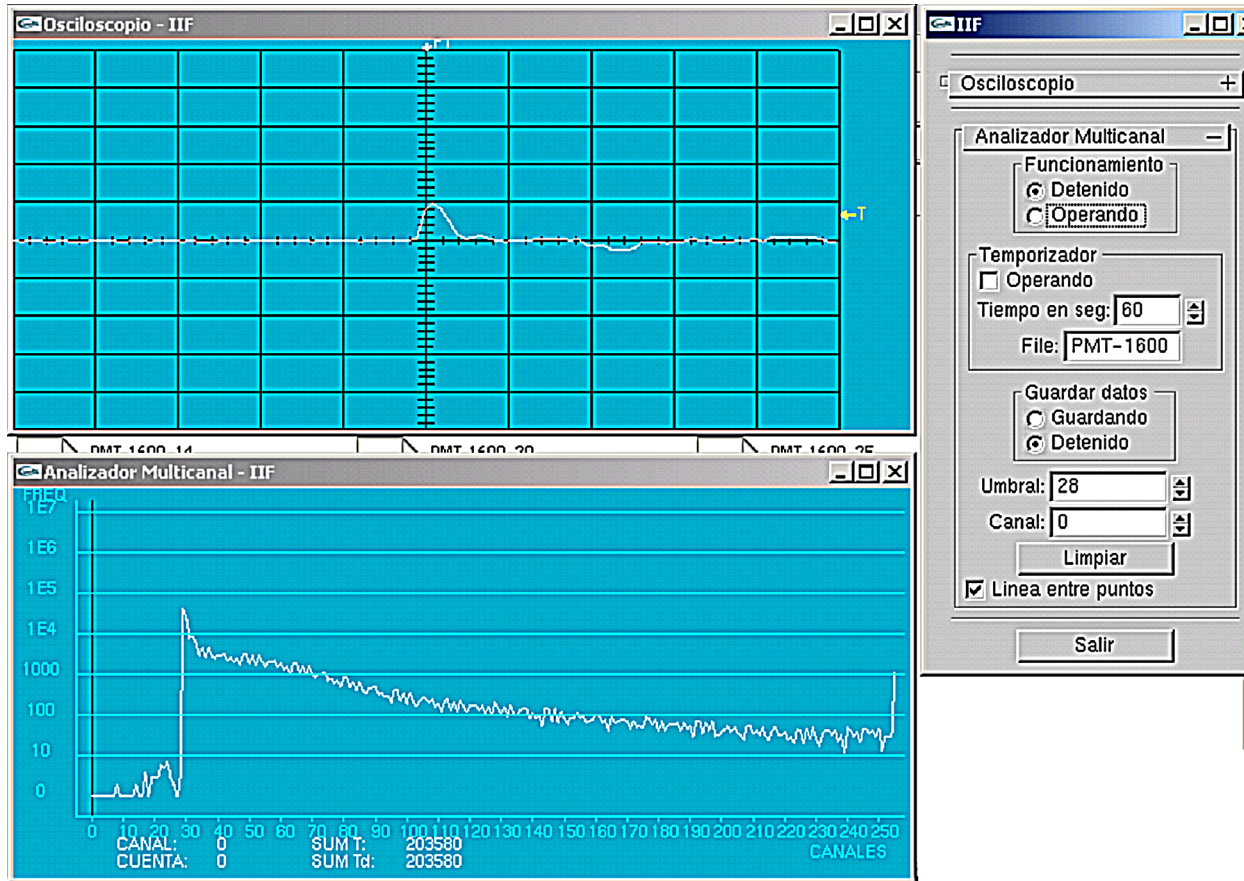


FIG. 3.— Ventanas de la interfaz gráfica.

### 3. SOFTWARE

#### 3.1. Diseño general

Tomando en cuenta la capacidad de los FPGAs de ejecutar instrucciones en paralelo, se han implementado el Osciloscopio de Almacenamiento Digital y el Analizador Multicanal en un mismo diseño escrito en lenguaje de descripción de *hardware* (HDL). Ya que los dos instrumentos ejecutan conjuntos de procesos por separado, y estos procesos acceden a recursos compartidos, se ha visto de gran utilidad describir el diseño mediante diagramas de acceso, éstos son diagramas de interconexión funcionales para diseños concurrentes. En la Fig. 2 se tiene la representación funcional del diseño general, donde los componentes activos o procesos son presentados como círculos y los componentes pasivos como rectángulos, las flechas representan derechos de acceso o conexiones.

Los módulos OSC y PMCA corresponden a los dos instrumentos, Osciloscopio y Analizador Multicanal de Pulsos, respectivamente. Ambos módulos agrupan procesos y realizan el control de bancos de memoria RAM propios. También se puede observar que los procesos representados por dos círculos concéntricos son procesos que responden requerimientos de interrupción (IRQ), que deben entenderse desde el punto de vista del dispositivo: éste se encuentra realizando un proceso y a partir de un evento se pone en marcha otro proceso.

Ambos módulos utilizan recursos comunes, el mismo canal de comunicación con el ordenador (puerto serial) para enviar datos y recibir comandos, y los datos entregados por el convertor análogo digital; éste se encuentra configurado en modo libre, entregando el resultado de una conversión cada  $10\text{ns}$ .

El proceso FADC realiza un seguimiento continuo de la señal digital de entrada, una vez que esta señal cumple ciertas condiciones, éste proceso avisa al módulo OSC que comience la grabación de los datos digitales en posiciones consecutivas de la memoria RAM. Una vez que se han grabado todas las posiciones de la memoria disponibles, el módulo OSC accede al proceso  $Rx/Tx$ , y envía el contenido total de la memoria RAM al ordenador a través de la interfaz serial.

De manera similar ocurre el funcionamiento del módulo PMCA, el proceso FADC identifica el máximo (digital) de un pulso, con este dato accede al módulo PMCA, éste a su vez actualiza la cuenta del respectivo canal (en la memoria del espectro) y devuelve el control al proceso FADC. Si el módulo PMCA recibe el comando *enviar* todos los datos de la memoria de espectro al ordenador, se detiene el proceso de actualización del PMCA, se accede al proceso  $Rx/Tx$  y se envía el contenido total de la memoria de espectro al ordenador a través de la interfaz serial.

Las opciones implementadas para el instrumento Osciloscopio son las siguientes: velocidad de muestreo, nivel de dis-

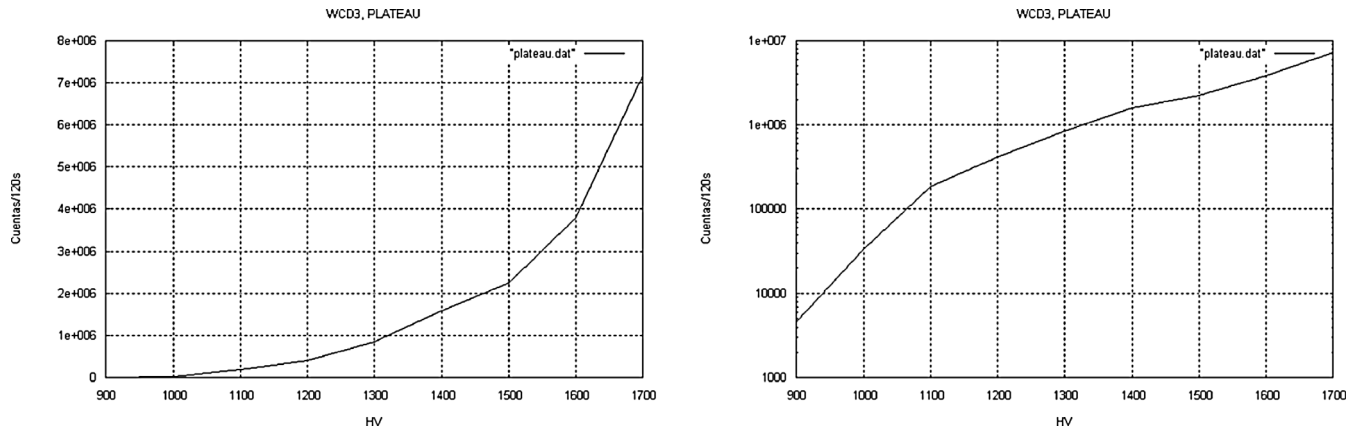


FIG. 4.— Curva de *plateau* para PMT 9353KB.

paro, pendiente de disparo, predisparo y autodisparo. Las opciones implementadas para el instrumento Analizador Multicanal son: nivel de discriminación o umbral, control de inicio/fin, borrado de toda la memoria de espectro, envío de datos al ordenador.

### 3.2. Interfaz gráfica

El software escrito en visual C++ realiza las siguientes funciones:

- Acceso al puerto de comunicación serial del ordenador para adquirir los datos.

- Proceso y despliegue gráfico de los datos capturados por el instrumento.

- Operación de las funciones del instrumento a través de una interfaz gráfica de usuario.

El acceso al puerto serial se realizó a través de funciones de API de *windows*, que facilitó el manejo de *buffers* de datos de envío y recepción y la modificación de los parámetros de transmisión. Teniendo en cuenta la gran utilidad de visualizar los datos capturados por el instrumento, el despliegue de gráficos se realizó utilizando librerías *OpenGL*<sup>3</sup>, que facilitan la representación de datos y su animación en dos dimensiones, logrando de esta manera una representación adecuada para los instrumentos Osciloscopio y Analizador Multicanal.

Un ejemplo del despliegue de datos en la interfaz gráfica se puede observar en la Fig. 3. En la parte superior está la ventana correspondiente al instrumento Osciloscopio con un pulso generado por el detector de Rayos Cósmicos, en la parte inferior está la ventana del Analizador Multicanal de pulsos con un espectro característico de Rayos Cósmicos y en la parte derecha está el menú de opciones de los instrumentos.

## 4. RESULTADOS

Una vez efectuadas varias pruebas con un generador de funciones, se verificó que la interfaz gráfica en la PC muestra correctamente los datos captados por el instrumento Osciloscopio. Los controles proveídos en el diseño hacen posible que se puedan observar señales en el rango de frecuencias de 1 *KHz* hasta 50 *MHz*; el límite superior es dado por el

teorema de Nyquist ya que el ADC utilizado trabaja a una frecuencia de 100 *MHz*. Aunque en la práctica, para obtener una forma de onda más detallada es necesario tener por lo menos nueve muestras, en vez de dos muestras por periodo. Esto hace que la máxima frecuencia, presente en la señal a analizar debe ser de  $\frac{1}{4}$  la frecuencia de muestreo. Los pulsos producidos por un PMT tienen una frecuencia aproximada de 40 *MHz*, estos pulsos son detectados por el instrumento Osciloscopio (dos o tres muestras por pulso) y registrados en un archivo para posterior análisis.

Se aplicó el instrumento Analizador Multicanal de pulsos a la determinación de la curva de *plateau* para un fotomultiplicador 9353KB de *Electron Tubes*<sup>4</sup>. El fotomultiplicador se encuentra instalado conjuntamente a un centelleador de agua, denominado WCD3, en el Laboratorio de Física Cósmica, en el monte Chacaltaya.

Se polarizó con alto voltaje (HV) el fotomultiplicador y se realizó el conteo de pulsos durante un tiempo fijo. Se polarizó el PMT de 900 a 1700 *V*, en intervalos de 100 *V*.

Los resultados de la aplicación se observan en la Fig. 4 en escala lineal y logarítmica. En esta última se puede apreciar mejor la región en la que un aumento del alto voltaje causa una menor diferencia entre las cuentas. Entre 1100 *V* y 1400 *V* está un segmento con menor pendiente; por lo tanto en ese segmento, a diferencia de otros, las cuentas no aumentarán significativamente conforme vaya aumentando el alto voltaje. Según la Fig. 4, el valor sugerido para polarizar el PMT es de 1200 *V*, y éste es el valor<sup>5</sup> elegido para la operación de WCD3 en Chacaltaya.

Además de las cuentas totales de pulsos, también se dispone del espectro de picos, correspondiente a cada alto voltaje aplicado al PMT de WCD3. Se han comparado estos espectros con las mediciones independientes realizadas por el proyecto LAGO para WCD3, y se ha verificado que los espectros son similares para cada alto voltaje.

Los instrumentos descritos han sido diseñados para su uso específico en la observación de señales eléctricas rápidas, producidas por rayos cósmicos, en general de alta energía,

<sup>4</sup> *Electron Tubes Enterprises Ltd.*, <http://www.electrontubes.com>.

<sup>5</sup> Este valor fue elegido después de varias pruebas con equipos especializados instalados en Chacaltaya.

<sup>3</sup> *OpenGL User Interface Library*, <http://glui.sourceforge.net>.

del proyecto LAGO, pero éstos también tienen un uso general. En el caso del Osciloscopio, puede utilizarse como un instrumento de laboratorio de nivel universitario, para la observación de señales periódicas y no periódicas, dada su alta tasa de conversión (100 MSPS). En el caso del Analizador

Multicanal, éste es muy útil en análisis de espectroscopía nuclear, en el cual la distribución de probabilidad de la radiación detectada está en función de su energía. El Analizador Multicanal también puede utilizarse en aplicaciones en las que se requiera el conteo de pulsos.

#### REFERENCIAS

Rivera, B. H. 2007, Implementación y Calibración de un Prototipo de Detector Cherenkov de Chubascos Atmosféricos (Tesis de Grado, Universidad Mayor de San Andrés)