

Sobre el detector BATATA

Laboratorio Avanzado - Detección de Rayos Cósmicos

Favio Vázquez^{*1}, Susana Marín^{**2}, Francisco Huante^{***1}, and Antonio
Rojas^{****3}

¹*Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México*

²*Instituto de Química, Universidad Nacional Autónoma de México*

³*Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México*

Índice

Introducción	2
1. Discusión del detector	3
1.1. Geometría del detector	3
1.2. El centellador	4
1.2.1. Fibra óptica	5
1.3. Electrónica	6
1.4. Tubo fotomultiplicador	7
2. Críticas y propuestas al detector	8
Conclusiones	11

*favio.vazquezp@gmail.com
**susyma3005@gmail.com
***francisco.huante@correo.nucleares.unam.mx
****tinyplack@gmail.com

Introducción

BATATA (Buried Array Telescope at Auger) es un detector prototipo que se añadió a AMIGA para cuantificar la contaminación electromagnética, y medir el radio entre la componente muónica y electromagnética proveniente de las lluvias de rayos cósmicos como una función de la profundidad subterránea. El detector se instaló en el arreglo AMIGA y se seleccionaron lluvias de aire extensas de alrededor de 10 PeV con un arreglo triangular de 200 m de lado compuesto con estaciones Cherenkov de superficie 3+2 de Auger.

En este breve reporte hicimos una discusión de la geometría general del instrumento, el centellador, la electrónica y los tubos fotomultiplicadores que lo constituyen. Luego se hizo una discusión de algunas posibles críticas y cambios que se le podrían hacer a BATATA.

Discusión del detector

1.1 Geometría del detector

El detector está compuesto por tres planos de doble capa horizontales enterrados a diferentes profundidades. Cada capa en un plano consiste en 49 tiras rectangulares de 2 m de largo, 4 cm de ancho y un 1 cm de grosor. Las dos capas del plano están rotadas 90° para producir un plano $x - y$ efectivo con $4,1 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$ píxeles cubriendo un área de 4m^2 . Cada plano $x - y$ está adentro de una cubierta hecha de fibra de vidrio. Dos tapas permiten el acceso a las tarjetas del “front-end” y los acoplamientos entre los tubos fotomultiplicadores y las galletas de fibra óptica. Las tapas pueden ser desmontadas para inspección y servicio. Más aún, las cubiertas y tapas son lo suficientemente versátiles para permitir la adición de nuevos componentes y cableados no especificados en el diseño original. El consumo de potencia de BATATA es menor que 200 W. Ésta es suministrada por un arreglo de 20 paneles solares con sus correspondientes baterías, que aseguran una operación continua aún en los meses de invierno donde no hay mucho sol.

Debajo se muestran algunas imágenes de la geometría del detector,

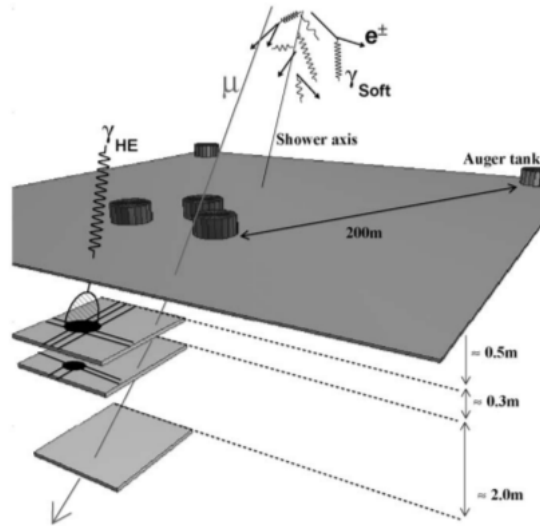


Figura 1: Tanques tipo Auger en la superficie y centelladores de plásticos del detector y su principio de trabajo. Tomada de [1].

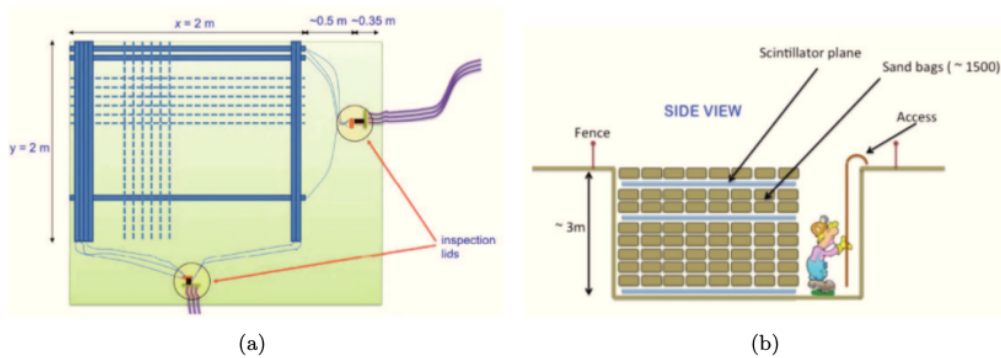


Figura 2: (a) Vista esquemática de la disposición de los centelladores, fibras ópticas, tubos fotomultiplicadores y electrónica de front-end adentro de la cubierta de cualquiera de los tres planos del detector. (b) Vista lateral esquemática de la disposición del detector. Tomada de [2].

El “punch trough” como función de la profundidad está muy fuertemente correlacionada con la composición química del suelo en el cual el detector está enterrado. Por lo tanto fue muy importante conocer cuan representativo es el suelo sobre BATATA y su comparación con el suelo sobre los otros contadores del arreglo AMIGA. Para hacer esto se realizó una caracterización mineralógica, geoquímica y del tamaño de los granos de toda el área de AMIGA, y particularmente el área donde está BATATA. Se hicieron varios estudios, entre ellos mediciones de densidad, análisis de tamaño de grano, caracterización de la forma de los granos, geoquímica de elementos principales por fluorescencia de rayos-X, y composiciones minerales por difracción de rayos-X.

Químicamente, la arena resultó ser muy homogénea a una profundidad de pocos metros, mostrando altos contenidos de silicio, aluminio, hierro y calcio. La composición promedio de la arena se acerca a la composición del granito. La densidad medida promedio fue de 1.7 g/cm^3 para la arena y 2.1 gm^3 para la gravilla. En condiciones de agua saturada, la densidad aumentó a 25 % en sedimentos de arena. La porosidad efectiva calculada para la arena fue de 34 % y 25 % para la gravilla.

1.2 El centellador

BATATA utiliza un tipo de centellador orgánico de plástico con fibras ópticas que recorren la longitud de onda. Los centelladores orgánicos se pueden solicitar a los fabricantes en forma de carretes con sección transversal pequeña o en varas que se encuentran pre-cortadas, para facilitar su colocación, o directamente como detectores. Los centelladores sólidos han sido utilizados extensivamente en los detectores de física de partículas, y en particular estos han sido los detectores preferidos para calorímetros de muestreo. Algunas características fueron requeridas para los centelladores que se utilizaron en la construcción de BATATA, entre ellas:

- Buena resolución energética: La salida de luz debía ser suficiente para que la eficiencia de detección para los muones cruzando una tira fuera mayor a 90 %.
- Uniformidad: Para asegurar que era posible corregir para la dependencia de posición de los eventos de lluvia, la salida de luz de las tiras centelladoras no debía variar más de 30 % con respecto a la respuesta nominal a esa posición.
- Atenuación: La luz observada desde los lados cercanos y lejanos de las tiras no debía diferir más que un factor de 5.

- Temporización rápida: Los detectores de centelleo debían tener propiedades intrínsecas que permitieran temporización en nanosegundos.
- Flexibilidad en la lectura de salida.
- Construcción simple y robusta: Que el ensamblado de las tiras de centellador sólidas en los módulos del detector requiriera poco hardware y experiencia.
- Estabilidad a largo plazo: La salida de luz del sistema centellador debía tener una estabilidad a largo plazo con un tiempo de decaimiento de al menos 10 años.
- Bajo mantenimiento: El sistema debía ser bastante robusto y requerir bajo mantenimiento.
- Confiabilidad: No deberían existir fallas en los centelladores que no puedan ser reparados externamente. Se debería poder corregir el decrecimiento en la salida de luz usando datos de calibración.

Las tiras centelladoras son tipo MINOS [3]. Están hechos de poliestireno, dopados con los flúor PPO (1 %) y POPOP (0.030 %). Este compuesto es derretido y extruido en la forma de una barra rectangular con una ranura angosta a lo largo del centro de uno de los lados anchos. La profundidad de la ranura es lo suficiente para contener una fibra óptica de 1.5 mm de diámetro. Una fina capa exterior de TiO_2 (0.25 mm) recubre la barra centelladora casi totalmente excepto por una pequeña región cerca de la ranura y los extremos laterales, para prevenir que luz escape y se incremente la probabilidad de captura por la fibra óptica. Cada tira de centellador tiene 4.1 cm de ancho, 1 cm de grosor y 2 m de largo.

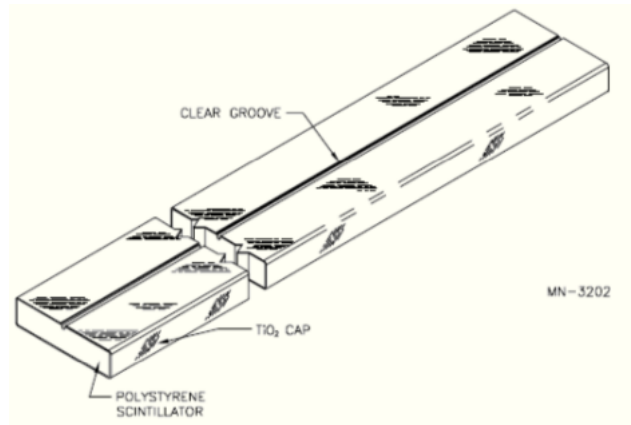


Figura 3: Vista esquemática de una tira centelladora con ranura y cobertura reflectiva. Tomada de [2].

1.2.1 Fibra óptica

Para garantizar una salida de luz aceptable, las fibras ópticas producidas por Bicon y Kuraray fueron probadas en el laboratorio. Se escogió para el detector una fibra óptica de desplazamiento de longitud de onda (WLS¹ en inglés). Cuando una partícula cargada viaja a través de la barra centelladora, una fracción de la luz producida es colectada por la fibra óptica y re-emitida a una longitud de onda diferente. Cada una de las capas x o y de BATATA necesita al menos 141.4 m de fibra óptica, por lo tanto el requerimiento total de fibra óptica del detector es de 848-4 m.

¹Wavelength shifting fibers.

El acoplado de la fibra óptica al tubo fotomultiplicador requiere de un pulido muy fino de la superficie que toca el vidrio en el final del fotocátodo. Para este propósito se usó un cuchillo de hojilla que proveyera un corte eficiente, y se necesitó mucho cuidado para evitar que se rompieran las fibras. Luego del cortado se requirió un fino pulido para asegurar una punta plana y perpendicular al eje de la fibra. Este paso fue muy importante debido a que una punta inclinada o sucia no puede ser acoplada al tubo fotomultiplicador sin que resulte en una considerable pérdida de luz. Se hicieron muchas pruebas para determinar el buen funcionamiento de las fibras, y se limpiaron y pulieron las fibras por última vez para asegurar una buena conexión con los tubos fotomultiplicadores. Debajo se muestran las puntas de las fibras luego de cada etapa.

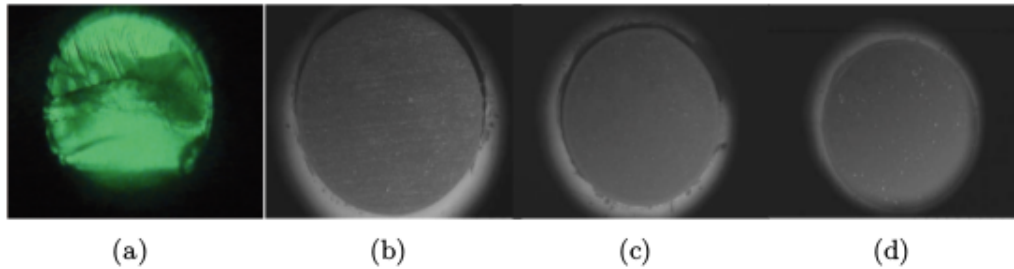


Figura 4: Vista frontal de una fibra obtenida con un microscopio electrónico para los diferentes pasos del pulido. (a) luego del cortado; (b) luego del pulido con una lija de 2000-grit; (c) luego del pulido con una lija de $3\ \mu\text{m}$; (d) luego de un segundo pulido con una lija de $3\ \mu\text{m}$. Tomada de [2].

1.3 Electrónica

La luz de centellador proveniente de cada capa es colectada por un tubo fotomultiplicador de 64 píxeles (H7546B). La electrónica funciona en modo de contador y las señales son transmitidas a la superficie de la etapa de adquisición de datos usando una señalización diferencial de bajo voltaje. Una señal lógica es producida solo cuando la altura del pulso analógico es mayor que un umbral dado, y los umbrales de cada canal puede ser ajustado independientemente a tiempo real. Cualquier señal sobre el umbral abre una ventana de colección de datos de $2\ \mu\text{s}$ GPS. Los datos, incluyendo la señal y el fondo, se adquieren con un sistema de tarjetas FPGA Spartan y una computadora TS7800 de una sola tarjeta. El código que controla el flujo de los datos en el nivel de FPGA fue escrito en VHDL (VHSIC - Very High Speed Integrated Circuits-hardware description language). Las tarjetas de front-end tienen $12,3'' \times 9,3''$ y comprenden 64 canales, pero solo se usan 49. Los tubos fotomultiplicadores multinodo y su suministro de alto voltaje están localizados en la tarjeta. Cada canal contiene:

- Una etapa de amplificación que usa un AD8009 operado con un factor de amplificación cercano a 6.
- Una etapa de discriminación, que usa un MAX9201 de alta velocidad, baja potencia y comparador cuádruple con retraso de propagación rápida (7ns typ a un overdrive de 5mV) conectado en modo bipolar.
- Un convertidor digital-analógico TLC7226C para colocar independientemente un voltaje de discriminación en cada canal.
- Un driver de línea diferencial de alta velocidad SN55LVDS31 para transformar la salida del discriminador en una señal diferencial.

Debajo se muestra una vista esquemática de la tarjeta electrónica correspondiente a una sola capa, también se indican los componentes principales. Cuando los eventos de lluvias llegan al detector puede disparar al menos 10 canales en una escala temporal de microsegundos, lo cual es una tasa mucho más grande que el fondo en kHz del detector debido a la baja energía de los rayos cósmicos y radioactividad natural.

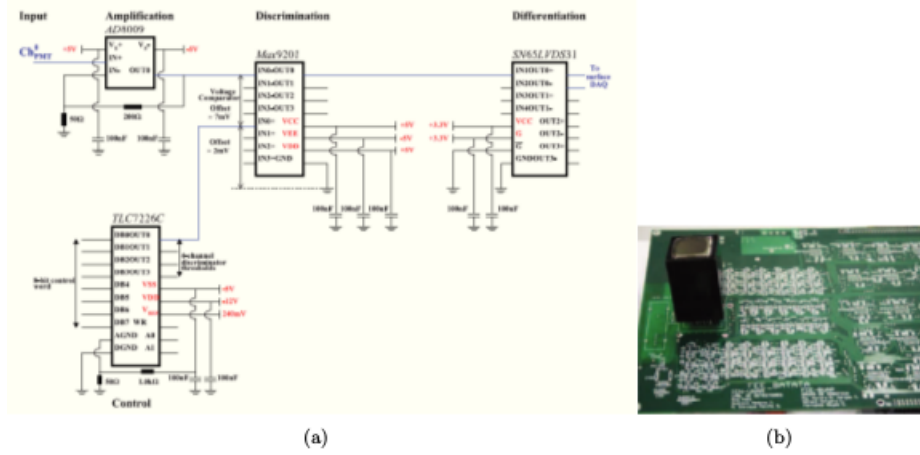


Figura 5: (a) Diagramas de canales de front-end, exceptuando el amplificador, cada dispositivo controla 4 canales. Entonces en una tarjeta de front-end existen 16 de esos componentes y 64 amplificadores. (b) Vista general de la tarjeta de frond end con el tubo fotomultiplicador multiánodo. Tomada de [2].

1.4 Tubo fotomultiplicador

BATATA usa fotomultiplicadores multiánodos Hamamatsu H7546B. Las principales características de estos dispositivos son:

- 8×8 con un tamaño de ánodo $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$.
- Área efectiva de $18.1 \text{ mm} \times 18.1 \text{ mm}$.
- Respuesta de alta velocidad.
- Bajo cross-talk (2 % típicamente).
- Alta sensibilidad del cátodo.

El voltaje de operación del dispositivo es 950 V. La figura de abajo muestra la curva de ganancia obtenida y la distribución de pulsos de carga para el punto de operación. El pico gaussiano alrededor de cero en la figura es la distribución de carga de la línea base, mientras el pico de la derecha es la distribución de carga de foto-electrones simples.

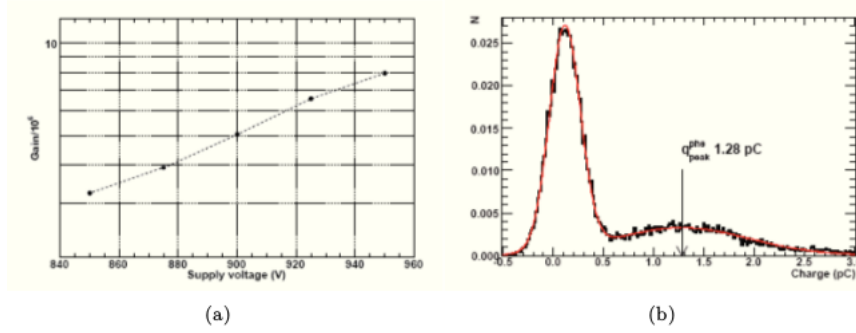


Figura 6: (a) Ganancia del tubo fotomultiplicador como función del voltaje suministrado. (b) Espectro para fotones simples para un voltaje suministrado de 950 V, con su ajuste superpuesto. Tomada de [2].

Críticas y propuestas al detector

La fibra óptica utilizada es BCF-92, la longitud de onda en la cual emite es la correspondiente al color verde, con un pico en 492 nm, con un tiempo de decaimiento de 2.7 ns [4].

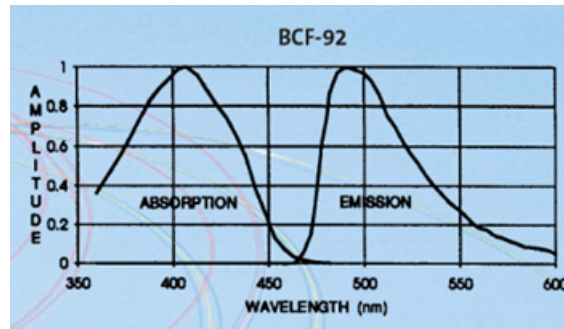


Figura 7: Espectros absorción y emisión de la fibra óptica BCF-92.

Los diferentes compuestos que pueden conformar este tipo de centelladores son: para la base del centellador: poliestireno, tolueno de polivinilo, PMMA, benzol polifenilo, etc. El centellador primario: p-Terphenyl, PPO, t-PBD, entre otros. Para el corrimiento de la longitud de onda: POPOP, BBQ y bis-MSB.

Se propone utilizar en lugar de fibras de poliestireno, Tolueno de polivinilo. Como por ejemplo está el centellador plástico: BC-400, que está compuesto por Tolueno de polivinilo y el tiempo de decaimiento es menor que el centellador utilizado en BATATA, su temperatura de operación tiene un amplio rango a temperaturas bajas, depende del lugar donde se colocará BATATA, podría ser una buena alternativa si se tienen temperaturas muy bajas, sin embargo tiene un problema la distancia de atenuación es de 1.6 m, así que si se utilizará este tipo de centellador, se tendría que modificar la geometría, disminuyendo la longitud de las barras centelladoras, el problema con esto es que se perdería área efectiva, y la cantidad de partículas detectadas disminuiría. A continuación se muestra una imagen de una tabla con la comparación entre centelladores con base de poliestireno, tolueno de vinil, y yoduro de sodio, tomada de [5].

Property	BCF-20	BC-400	NaI(Tl)
Detector base	PS	PVT	Sodium iodide
Chemical composition	C ₈ H ₈	C ₁₀ H ₁₁	NaI(Tl)
Density [gcm ⁻³]	1.05	1.032	3.67
Refractive index	1.6	1.58	1.85
Emission color	Green	Blue	Indigo
Emission peak [nm]	492	423	415
Decay time [ns]	2.7	2.4	250
Attenuation length [m]	>3.5	1.6	0.028
Number of photons per MeV	~8000	~10000	~40000
Characteristics/applications	Fast green	General purpose	General purpose
Operating temperature	-20 °C to +50 °C	-60 °C to +20 °C	—
Ratio of H:C atoms	~1.006	~1.103	—

La eficiencia cuántica de los tubos fotomultiplicadores varía entre 10-30 % dependiendo de la longitud de onda, del fotocátodo y de la ventana de entrada del material. Son sensibles a campos magnéticos, lo cual no es problema en BATATA ya que los tubos fotomultiplicadores se encuentra aislada de ruido electromagnético al estar alejado de ciudades grandes. El material del fotocátodo es un bialcalino, tienen una respuesta espectral al fotocátodo de Sb-Cs, pero tiene mayor sensibilidad y menor corriente oscura.

Puede proponerse verificar si existen nuevos tubos fotomultiplicadores que pueden ser utilizados en BATATA, por ejemplo la misma compañía, Hamamatsu, tienen la fotomultiplicadores H7546B-100, la cual tiene mayor sensibilidad lumínica en el cátodo y en el ánodo, lo cual serviría para mejorar la resolución energética y la calidad de la señal recibida y posiblemente la eficiencia cuántica aumente. El material del fotocátodo es un súper bialcalino, el cual tiene mayor sensibilidad aún. La compañía saca continuamente nuevos tubos fotomultiplicadores que van mejorando los materiales del fotocátodo aumentando así la sensibilidad. Así que también se propone estar actualizados con las nuevas tecnologías que puedan mejorar la propiedades de detección de los instrumentos y de los tubos fotomultiplicadores en particular, ya que son un elemento vital para una buena transformación de la luz proveniente de los centelladores, y mientras más resolución se tenga, con más precisión se podrán cumplir los objetivos de BATATA.

Por otro lado, se pueden usar también plásticos alifáticos, como por ejemplo el acrílico, aunque tienen la mitad de eficiencia lumínica que los plásticos aromáticos. Los centelladores líquidos con aditivo de gadolinio son frecuentemente usados en física de altas energías. La eficiencia de detección incrementa no sólo con grandes secciones transversales, sino también con altas concentraciones de Gd en el centellador. Usualmente las sustancias que contienen Gd son insertadas en un medio líquido, formando, por ejemplo, centelladores líquidos. Pero el uso práctico de centelladores líquidos está relacionado a muchos problemas de la estabilidad del tiempo de los aparatos de detección y la seguridad. Cambiando la base de un centellador líquido a uno sólido o plástico puede ser una forma resolver esos problemas. Se puede proponer usar un aditivo auxiliar para centelladores plásticos que absorba en la región de absorción del aditivo lumínico primario y emita en la región de emisión del aditivo lumínico secundario. Este tipo de centellador muestra una eficiencia lumínica del 62 % con respecto a la del centellador estándar.

El sistema de lectura de BATATA consiste de tres tarjetas FPGAs Spartan 2E de Xilinx y una computadora SBC Linux. La computadora es el cerebro de operación del sistema puesto que mediante el envío de comandos puede configurar las FPGAs y además recolectar los datos de detección recibidos y procesados por estas. Sin embargo, podríamos proponer algunos cambios en la electrónica, por ejemplo, las FPGAs se utilizan en aplicaciones similares a los ASICs, sin embargo son más lentas, tienen un mayor consumo de potencia y no pueden abarcar sistemas tan complejos como ellos. A pesar de esto, las FPGAs tienen las ventajas de ser reprogramables (lo que añade una enorme flexibilidad al flujo de diseño), sus costes de desarrollo y adquisición son mucho menores para pequeñas cantidades de dispositivos y

el tiempo de desarrollo es también menor.

Las FPGAs se utilizan en aplicaciones similares a los ASICs pero tienen una serie de conveniente así como de ventajas respecto a estos últimos. Como inconvenientes podemos decir que son más lentas, consumen mayor potencia y no pueden realizar sistemas excesivamente complejos. Como ventajas podemos ver que son reprogramables, los costes de desarrollo y adquisición son mucho menores y el tiempo de diseño y manufacturación es menor. Muchos FPGA modernos soportan la reconfiguración parcial del sistema, permitiendo que una parte del diseño sea reprogramada, mientras las demás partes siguen funcionando. Este es el principio de la idea de la “computación reconfigurable”, o los “sistemas reconfigurables”. Las desventajas del diseño totalmente a la medida son un costo y tiempo de desarrollo mayores, costos fijos mayores, mayor complejidad del software CAD y la necesidad de habilidades mucho mayores por parte del equipo de diseño.

Conclusiones

En este breve reporte que hemos realizado, se hizo una descripción de los elementos del detector BATATA, así como una pequeña crítica y propuesta de algunos cambios que se le pueden hacer a partes de los instrumentos. Al hacer un estudio de los artículos técnicos de BATATA y algunas tesis sobre su diseño y construcción vimos que el diseño y la construcción del instrumento fue muy bien pensada. Se hicieron compromisos, los cuales no quedan claros para un observador externo al proyecto, pero tenemos una idea de que se tuvieron que hacer para bajar costos y no disminuir demasiado la calidad.

Luego de mucha investigación, pudimos encontrar pocas cosas que criticar y mejoras que proponer, pero la principal conclusión es que hay que mantenerse actualizado y verificar si existen nuevas tecnologías que puedan mejorar el instrumento en general, y sus elementos internos. Obviamente habría que esperar algún artículo de la colaboración Auger en la que se reporten los resultados de BATATA, ya que sin los mismos no tenemos una idea concisa si los elementos, materiales, geometría y características que hemos descritos funcionarán. Con esto podrían hacerse propuestas y críticas mucho más formales y específicas; por lo tanto con lo que hemos realizado creemos que aunque no sea mucho, puede verse como una posible mejora directa luego de que se produzcan los primeros resultados.

Referencias

- [1] R. Alfaro et al., *Buried plastic scintillator muon telescope (BATATA)*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, vol. 617, pp. 511-514, 2010.
- [2] E. Trovato, *Perfomance study of the muon prototype detector at the Pierre Auger Observatory*, Tesis de Doctorado, Università Degli Studi Di Catania, 2011.
- [3] The MINOS Collaboration, *MINOS Technical Desing Report*, Documento interno FNAL, NuMI-L-337, 1998.
- [4] Saint-Global Crystals, *Scintillation Products*, 2000.
- [5] S. Mirza et al., *Influence of various geometries on detection efficiency of polystyrene, polyvinyl-toluene, and sodium iodide Detectors using Geant4*, Influence of Variou Geometries on Detection Efficiency of Nuclear Technology & Radiation Protection, vol. **30**, pp. 188-197.