



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE FÍSICA Y MATEMÁTICA

**CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE DETECTOR DE
RADIACIÓN AMBIENTAL CON CENTELLADORES PLÁSTICOS**

TRABAJO DE TITULACIÓN

TIPO: PROYECTO EXPERIMENTAL

Trabajo de titulación presentado para optar al grado académico de:

BIOFÍSICO

AUTOR: LUIS ANTONIO GUALLICHICO GUALLICHICO

TUTOR: RICHARD WILLIAMS PACHACAMA CHOCA

Riobamba-Ecuador

2018

© 2018, Luis Antonio Guallichico Guallichico

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA Y MATEMÁTICA

El Tribunal del Trabajo de titulación certifica que: El trabajo de investigación: **Construcción de un prototipo de detector de radiación ambiental con centelladores plásticos**, de responsabilidad del señor Luis Antonio Guallichico Guallichico, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de titulación, quedando autorizada su presentación

Riobamba, 17 de Enero de 2018

Firma

Dr. Richard Williams Pachacama Choca
DIRECTOR DE TESIS

Msc. Dalinda Quingatuña
MIEMBRO DE TRIBUNAL

Dr. Bolivar Flores
MIEMBRO DE TRIBUNAL

Yo, Luis Antonio Guallichico Guallichico soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este Trabajo de titulación y el patrimonio intelectual del Trabajo de titulación pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Luis Antonio Guallichico Guallichico

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a tres personas fundamentales en mi vida, Mi madre María, Mi padre José y Mi hermano Jorge, quienes desde el inicio del emprendimiento de este nuevo sueño estuvieron junto a mí en todo momento. Jorge hermano mío, mi amigo y referente gracias a tu apoyo y tus consejos estoy culminando nuevamente un camino que se veía largo y dificultoso. Todo esto es para y por ustedes, los amo.

Antonio

AGRADECIMIENTO

Quiero en esta oportunidad expresar mi sincero agradecimiento a todos quienes permitieron que el presente trabajo de investigación llegue a su exitosa conclusión pero de forma muy especial:

Al Dr. Richard Pachacama, director del presente trabajo de investigación. Gracias por su tiempo, su paciencia, su confianza y la guía prestada para la culminación exitosa del mismo.

A Dennis Cazar PhD, por la apertura en el laboratorio LEOPARD en la Universidad San Francisco de Quito y la confianza brindada, quien desde el inicio como docente y luego como guía en esta investigación supo orientar y brindar sus conocimientos en todo momento para el logro de los objetivos y metas plateadas. Por su infinita paciencia mi eterna gratitud. Es el claro ejemplo de docente e investigador.

Al Ing. Bryan Talavera, por su tiempo, su amistad, sus conocimientos y su colaboración oportuna y desinteresada. Un excelente ingeniero electrónico, ejemplo de don de gente y humildad.

A Edgar Carrera PhD, por su tiempo y la colaboración inmediata brindada, y por sus enseñanzas en el manejo y análisis de información mediante ROOT.

Luis

CONTENIDO

pp.

| | |
|--|-----|
| RESUMEN..... | xv |
| SUMMARY..... | xvi |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| CAPITULO I | |
| 1. MARCO REFERENCIAL..... | 3 |
| 1.1 Antecedentes..... | 3 |
| 1.2 Planteamiento del problema..... | 4 |
| 1.3 Justificación..... | 5 |
| 1.4 Objetivos..... | 6 |
| CAPITULO II | |
| 2. MARCO TEÓRICO..... | 7 |
| 2.1 Radiación Natural..... | 7 |
| 2.1.1 <i>La radiación cósmica</i> | 8 |
| 2.1.2 <i>Radionúclidos cosmogónicos</i> | 8 |
| 2.1.3 <i>Radiación terrestre</i> | 9 |
| 2.2 El radón (Rn)..... | 10 |
| 2.3 Detectores de radiación ionizante..... | 11 |
| 2.3.1 <i>Detectores por ionización</i> | 13 |
| 2.3.1.1 <i>Cámara de ionización</i> | 13 |
| 2.3.1.2 <i>Contador proporcional</i> | 13 |
| 2.3.1.3 <i>Detector Geiger Müller</i> | 14 |
| 2.3.1.4 <i>Detectores de semiconductores</i> | 14 |
| 2.3.1.5 <i>Detectores de trazas nucleares de estado sólido (SSNTD)</i> | 15 |
| 2.3.1.6 <i>Detectores de carbón activado</i> | 15 |
| 2.3.2 <i>Detectores por Excitación</i> | 15 |
| 2.3.2.1 <i>Detectores de Termoluminiscencia</i> | 15 |
| 2.4 Detectores de Centelleo..... | 16 |
| 2.4.1 <i>Características de un detector de centelleo</i> | 18 |
| 2.4.2 <i>Mecanismo de centelleo</i> | 19 |
| 2.5 Tipos de centelladores..... | 21 |
| 2.5.1 <i>Centelladores orgánicos</i> | 21 |

| | | |
|---------|---|----|
| 2.5.1.1 | <i>Cristales orgánicos</i> | 21 |
| 2.5.1.2 | <i>Líquidos orgánicos</i> | 21 |
| 2.5.1.3 | <i>Centelladores plásticos</i> | 22 |
| 2.5.1.4 | <i>Centelladores gaseosos</i> | 22 |
| 2.5.1.5 | <i>Vidrios orgánicos</i> | 22 |
| 2.6 | Detectores de radiación con centelladores plásticos..... | 23 |
| 2.6.1 | <i>Centellador plástico</i> | 24 |
| 2.6.2 | <i>Partes de un detector de radiación a base de centelladores plásticos</i> | 24 |
| 2.6.2.1 | <i>Fotomultiplicadores de Silicio (SiPM)</i> | 25 |
| 2.6.2.2 | <i>Sistema de Adquisición de datos (DAQ)</i> | 26 |
| 2.7 | Monitoreo de radiación ambiental mediante detectores a base de centelladores plásticos..... | 27 |

CAPÍTULO III

| | | |
|---------|--|----|
| 3 | METODOLOGÍA..... | 28 |
| 3.1 | Métodos y técnicas..... | 28 |
| 3.1.1 | <i>Tipo de investigación</i> | 28 |
| 3.1.2 | <i>Materiales</i> | 29 |
| 3.1.2.1 | <i>Centellador Plástico</i> | 30 |
| 3.1.2.2 | <i>Fotomultiplicador de Silicio (SiPM)</i> | 31 |
| 3.1.2.3 | <i>Tarjeta de polarización</i> | 31 |
| 3.1.2.4 | <i>QuarkNet DAQ</i> | 32 |
| 3.1.2.5 | <i>C++ y ROOT</i> | 32 |
| 3.1.3 | <i>Diseño experimental</i> | 33 |
| 3.1.4 | <i>Adquisición de datos</i> | 33 |
| 3.1.4.1 | <i>Adquisición desde la QuarkNet</i> | 33 |
| 3.1.4.2 | <i>Adquisición desde el osciloscopio</i> | 35 |
| 3.1.5 | <i>Análisis de los datos obtenidos</i> | 35 |
| 3.1.5.1 | <i>Datos de la QuarkNet</i> | 36 |
| 3.1.5.2 | <i>Datos obtenidos directamente del osciloscopio</i> | 36 |

CAPÍTULO IV

| | | |
|-------|---|----|
| 4. | ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS..... | 37 |
| 4.1 | Resultados obtenidos para el prototipo con la DAQ..... | 37 |
| 4.1.1 | <i>Paleta sin fuente Vs Paleta con fuente de ²⁴¹Am</i> | 37 |
| 4.1.2 | <i>Paleta sin fuente Vs Paleta con fuente de ⁹⁰Sr</i> | 38 |

| | | |
|----------------------|---|----|
| 4.1.3 | <i>Paleta sin fuente Vs Paleta con fuente de ^{137}Cs</i> | 41 |
| 4.2 | Análisis de los pulsos detectados en función de la altura de los pulsos (Osciloscopio) | 42 |
| 4.2.1 | <i>Fuente de emisión de partículas α (^{241}Am)</i> | 42 |
| 4.2.2 | <i>Fuente de emisión de partículas β (^{90}Sr)</i> | 43 |
| 4.2.3 | <i>Fuente de emisión gamma (^{137}Cs)</i> | 45 |
| 4.3 | Comprobación de la Hipótesis..... | 46 |
| CONCLUSIONES..... | | 48 |
| RECOMENDACIONES..... | | 50 |
| BIBLIOGRAFIA | | |
| ANEXOS | | |

INDICE DE TABLAS

| | pp. |
|---|-----|
| Tabla 1-2: Características de los principales decaimientos del ^{222}Rn y ^{220}Rn | 10 |
| Tabla 2-2: Dispositivos medidores de gas radón y sus principales características..... | 15 |
| Tabla 1-3: Fuentes radiactivas utilizadas en la fase experimental | 29 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | pp. |
|---|------------|
| Figura 1-2: Detector Electret..... | 13 |
| Figura 2-2: Detector de Radón de tipo LR-115 (En la parte central una lámina de LR-115) | 14 |
| Figura 3-2: Detectores de termoluminiscencia (TLD)..... | 16 |
| Figura 4-2: Mecanismo de centello | 18 |
| Figura 5-2: Configuración de un centellador plástico | 23 |
| Figura 6-2: Fotomultiplicadores de Silicio (SiPM), modelos de la serie C y J (SensL)..... | 25 |
| Figura 7-2: Diferentes tarjetas electrónicas para la recolección y adquisición de datos: Red Pitaya, b) QuarkNET DAQ, c) Raspberry Pi, d) Arduino Uno..... | 26 |
| Figura 1-3: SiPM utilizado modelo: MicroFC-60035-SMT | 29 |
| Figura 2-3: Tarjeta de polarización de los SiPM..... | 30 |
| Figura 3-3: QuarkNet DAQ serie 6000 | 30 |
| Figura 4-3: Pulso típico de un PMT, a partir del cual el ToT puede ser determinado | 30 |
| Figura 5-3: Archivo con extensión .DAT generado por la DAQ..... | 30 |
| Figura 6-3: Configuración inicial del prototipo de detector de radiación: a) plástico centellador en contacto con la fuente de ^{241}Am y b) plástico centellador en contacto con la fuente de ^{90}Sr | 30 |
| Figura 7-3: Disposición experimental para la segunda fase de recolección de datos con fuentes radiactivas..... | 30 |
| Figura 8-3: Tree de ROOT que contiene los TDC_LE y TDC_TE | 30 |

ÍNDICE DE GRÁFICAS

pp.

| | |
|--|----|
| Gráfica 1-2: Regiones de operación para un detector de ionización | 12 |
| Gráfica 1-4: 2a) TDC_LE para la paleta sin fuente (detección de muones), b) TDC_LE para la paleta con una fuente de ^{241}Am | 30 |
| Gráfica 2-4: a) TDC_TE para la paleta sin fuente (detección de muones), b) TDC_TE para la paleta con una fuente de ^{241}Am | 30 |
| Gráfica 3-4: a) TDC_LE para la paleta sin fuente (detección de muones), b) TDC_LE para la paleta con una fuente de ^{90}Sr | 30 |
| Gráfica 4-4: a) TDC_TE para la paleta sin fuente (detección de muones), b) TDC_TE para la paleta con una fuente de ^{90}Sr | 30 |
| Gráfica 5-4: a) TDC_LE para la paleta sin fuente (detección de muones), b) TDC_LE para la paleta con una fuente de ^{137}Cs | 30 |
| Gráfica 6-4: a) TDC_TE para la paleta sin fuente (detección de muones), b) TDC_TE para la paleta con una fuente de ^{137}Cs | 30 |
| Gráfica 7-4: a) Histograma de pulso para la paleta sin fuente, b) Histograma de pulsos para la paleta en contacto con la fuente de ^{241}Am | 30 |
| Gráfica 8-4: a) ToT para la paleta en contacto con la fuente de ^{90}Sr . b) Histograma de pulsos para la paleta en contacto con la fuente de ^{90}Sr | 30 |
| Gráfica 9-4: a) ToT para la paleta en contacto con la fuente de ^{137}Cs . b) Histograma de pulsos para la paleta en contacto con la fuente de ^{137}Cs | 30 |

INDICE DE ANEXOS

Anexo A: Propiedades de varios centelladores plásticos comerciales

Anexo B: Calibración del detector – Voltaje de trabajo del SiPM

Anexo C: Significado de las columnas del output de la QuarkNet DAQ

Anexo D: Adquisición de datos con la QuarkNet

Anexo E: Análisis de datos mediante ROOT

Anexo F: Forma de los pulsos para el centellador plástico en contacto con fuentes radiactivas

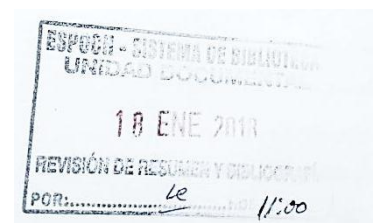
INDICE DE ABREVIATURAS

| | |
|--------------------|---|
| 1. CERN | Organización Europea para la Investigación Nuclear |
| 2. DAQ | Adquisición de datos (Data Acquisition) |
| 3. NORM | Material Radiactivo de Ocurrencia Natural |
| 4. MSv | miliSievert |
| 5. PMT | Tubo fotomultiplicador |
| 6. SCAN | Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares |
| 7. SiPM | Fotomultiplicador de silicio |
| 8. TDC | Convertor TDC - Time-to-Digital-Coverter |
| 9. TDC_LE | Borde frontal del pulso mediante un convertor TDC |
| 10. TDC_TE | Borde frontal del pulso mediante un convertor TDC |
| 11. TDL | Termoluminiscencia |
| 12. ToT | Tiempo sobre el voltaje umbral (Time-over-Threshold) |
| 13. UNSCEAR | Comité Científico de las Naciones Unidas para el estudio de los efectos de la radiación atómica |

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue la construcción de un prototipo de detector de radiación ambiental usando centelladores plásticos, que acopló un centellador plástico de dimensiones 25x25x1cm, un fotomultiplicador de Silicio (SiPM) y un sistema de adquisición de datos(DAQ – FPGA). El dispositivo fue colocado dentro de una caja oscura que lo aisló de la luz exterior en contacto con una fuente radiactiva (^{241}Am , ^{90}Sr y ^{137}Cs) y fue probado para una y dos paletas de centellador. La adquisición y análisis de la información se la realizó mediante dos sistemas diferente, el primero mediante adquisición directa de un osciloscopio, los archivos generados se analizaron en *Matlab* mediante la función *findpeak*, la cual arrojó información sobre la forma de los pulsos y sus amplitudes y anchuras; presentadas en histogramas voltaje-número de pulsos. El segundo utilizó una QuarkNet desarrollada por Fermilab, que hace uso del *time-to-digital-converter* (TDC) y las coincidencias entre eventos registrados en una ventana de tiempo de 1000ns, a través de la que los datos de los pulsos registrados son generados en un archivo .DAT que analizados mediante ROOT permitieron obtener histogramas del borde frontal y posterior del pulso detectado, TDC_LE y TDC_TE respectivamente, su diferencia permitió conocer el *time-to-over-threshold* (ToT), es decir el tiempo que dura un pulso determinado sobre un voltaje umbral, el cual en esta investigación fue de 30 mV. Los datos analizados muestran que para ambos sistemas, cuando el centellador se encuentra en contacto con una fuente de ^{241}Am las diferencias en las distribuciones de los voltajes o los ToT, referentes a los obtenidos para la paleta sin fuente son muy similares, mientras que para las fuentes de ^{90}Sr y ^{137}Cs , existen leves diferencias, casi imperceptibles; por lo que se recomienda la utilización de centelladores plásticos de un espesor menor a 1cm para futuras investigaciones.

Palabras claves: <BIOFÍSICA>, <RADIACIÓN>, <QUARKNET (TARJETA)>, < TIME-TO-DIGITAL-COVERTER (TDC) >, <TIME-TO-OVER-THERSHOLD (TOT)>, < SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS (DAQ – FPGA)>, <MATLAB (SOFTWARE)>



SUMMARY

The objective of this research was the construction of a prototype environmental radiation detector using plastic scintillators, which coupled a plastic scintillator of dimensions 25x25x1cm, a Silicon photomultiplier (SiPM) and a data acquisition system (DAQ-FPGA). The device was placed inside a dark box that isolated it from outside light in contact with the radioactive source (^{241}Am , ^{90}Sr , and ^{137}Cs) and was tested for one and two scintillator blades. The acquisition and analysis of the information were done through two different systems, the first by direct acquisition of an oscilloscope, the generated files were analyzed in Matlab using the findpeak function, which showed information about the shape of the pulses and their amplitudes and widths; presented in histograms voltage-number of pulses. The second used a QuarkNet developed by Femilab, which does, which makes use of the time-to-digital converter (TDC) and the coincidences between events recorded in a time window of 1000ns, through which the data of the recorded pulses are generated in a DAT file that analyzed by ROOT allowing obtaining histograms of front and back edge of the detected pulse, TDC_LE and TDC_TE respectively, their difference allowed to know the time-to-over-threshold (ToT), that is to say the time it lasts pulse determined over a threshold voltage, which in this investigation was 30 mV. The analyzed data show that both systems, when the scintillator is in contact with a source of ^{241}Am , the differences in the distributions of the voltages or the ToT, referring to the ones obtained for the palette without source are very similar, while for the sources of ^{90}Sr and ^{137}Cs , there are slight differences, almost imperceptible; therefore, the use of plastic scintillators with a thickness of less than 1 cm is recommended for future research.

Keywords: <BIOPHYSICS>, <RADIATION>, <QUARKNET (CARD)>, <TIME-TO-DIGITAL-COVERTER (TDC)>, <TIME-TO-OVER-THERSHOLD (TOT)>, <DATA ACQUISITION SYSTEM (DAQ - FPGA)>, <MATLAB (SOFTWARE)>



INTRODUCCIÓN

La medición de los niveles de radiación ambiental permite conocer la tasa de dosis de radiación que los habitantes de una determinada población han recibido durante cierto periodo de tiempo; dicha radiación ambiental está compuesta por radiación ionizante proveniente de fuentes artificiales y/o de origen natural conocidas como Material Radiactivo de Ocurrencia Natural (NORM, por sus siglas en inglés); entre las que destacan el ^{40}K y aquellos radionúclidos de las cadenas de decaimiento del ^{238}U y del ^{232}Th , que contribuyen al aumento del gas radón. Por otro lado se tiene la radiación cósmica (Solar o galáctica) cuya contribución al aumento de los niveles de radiación y por ende a un aumento en la tasa de dosis de radiación es parcial (UNSCEAR, 1993, pp. 34-42)

En general el monitoreo de los niveles de radiación ambiental en países de la región se lo realiza mediante la utilización de dosímetros de termoluminiscencia (TDL) (Mora Rodríguez y Mora Ramírez, 2006, pp. 21-30; Germanier, et al, sf, pp. 2-6), o mediante detectores portátiles Geiger-Müller (Manosalvas, 2006, pp. 78-81) entre los más utilizados, sin embargo en instrumentos como un TLD la información almacenada se destruye en el proceso de lectura. Se pueden utilizar además dosímetros electrónicos de lectura directa cuya mayor desventaja frente a otros instrumentos, son sus elevados costos. Estos últimos sin embargo están siendo actualizados con el uso de nuevos materiales detectores de radiación ionizante, unido a modernos sistemas de procesamiento de señales y sistemas de adquisición de datos; dichos detectores actuales se basan en la utilización de material centellante, el cual al ser expuesto a radiación ionizante (alfa, beta o gama) emiten un destello de luz.

Estos centelladores pueden ser orgánicos (líquidos o plásticos) e inorgánicos. La luz generada es convertida en impulsos eléctricos gracias a un fotomultiplicador, uno de los más usados es un tubo fotomultiplicador (PMT, por sus siglas en inglés), sin embargo en la actualidad se están usando con éxito fotomultiplicadores de silicio (SiPM) que presentan una eficiencia similar. Posteriormente la señal transducida por este tipo de sistemas pasa por un procesamiento electrónico de la señal, con lo cual esta permite obtener la información requerida.

Trabajos precedentes han demostrado que es posible construir detectores de radiación basados en centelladores, utilizando la proporcionalidad existente ente la energía y la altura de los pulsos generados (Mukhopadhyaya, 2015, pp. 1-12; Nanda et al, 2015, pp. 1-3), tras la interacción de la radiación con el centellador plástico, otros estudios dan cuenta de la aplicabilidad que podrían tener los centelladores plásticos en la detección de NORMs (J.H, 2003, pp. 1-5), e incluso se han realizado

estudios para la detección de radón, mediante el estudio de la absorción del mismo en este tipo de materiales (Mitev, 2016, pp. 236–243).

En Ecuador no se encuentran registros del monitoreo de los niveles de radiación ambiental, pues este se encuentra limitado a los centros médicos que utilizan radiación ionizante ya sea como método de tratamiento o diagnóstico de enfermedades (SCAN, sf). Ya que el país se encuentra situado en una zona de carácter volcánico y en el cual existen diferentes composiciones de suelos (incluso con materiales de origen radiactivo – Uranio en la zona de la Cordillera del Cóndor), sería de mucha importancia conocer los niveles de radiación ambiental a los cuales los habitantes de una determinada población se encuentran expuestos.

Los actuales instrumentos de medición de radiación ionizante como ya se lo ha mencionado anteriormente requieren de un monitoreo y calibración constante, por este motivo la presente investigación está dirigida hacia el diseño de un prototipo de detector de radiación ambiental utilizando plásticos centelladores, material presenta grandes características en la detección de un determinado tipo de radiación ionizante, el cual unido a un sistema eficiente de adquisición y procesamiento de datos permitirá identificar radiación que provenga de diferentes fuentes de radiación ionizante (emisores alfa, beta o gama).

CAPITULO I

1. MARCO REFERENCIAL

1.1 Antecedentes

La mayor parte de los detectores de radiación se basan en efectos producidos cuando una partícula cargada atraviesa un volumen de gas encerrado en una cámara, produciendo ionización o excitación (Pinchel, 2006, pp. 243-246), que posteriormente genera una diferencia de voltaje que es leído como un pulso eléctrico, proporcional a la energía que lleva la partícula incidente, sin embargo, esta clase de detectores dependen estrictamente de las condiciones ambientales.

De esta forma en las últimas décadas se están realizando intensas investigaciones para la utilización de nuevos materiales (en estado líquido o sólido) que permitan junto a un sofisticado sistema electrónico, la detección de partículas cargadas e incluso partículas de altas energía. Con este fin, se están desarrollando materiales centelladores, que pueden ser de tipo inorgánico (NaI (TI) el más empleado), orgánico, cerámico, líquidos, cristales o plásticos. Estos últimos (centelladores plásticos), muestran un alto potencial como detectores eficientes y seguros son aún más confiables que los de tipo líquidos, son más fácilmente escalables y más económicos que los inorgánicos (Dumazert, 2016, pp.181-190) son de fácil fabricación y ofrecen tiempos rápidos de respuesta (Campbell y Crone, 2007, pp 220-224)

En los últimos años, el proceso de fabricación de plásticos centelladores, se ha mejorado grandemente así como su aplicabilidad; tanto a nivel comercial como en laboratorios de investigación ya se puede encontrar plásticos centelladores capaces de detectar casi cualquier tipo de radiación que van desde rayos x, rayos gama (Van Loef, et al., 2014, pp. 121-128), neutrones (Van Loef, et al., 2014, pp. 121-128; Dumazert, et al., 2016, pp.181-190), partículas alfa y beta (Mitev, 2016, pp. 236-243) e incluso subpartículas atómicas de altas energías (Nanda et al, 2015, pp. 1-3). Además existen estudios para la combinación de plásticos centelladores con distintos sistemas de adquisición de datos, así como sistemas de conversión de luz en señales eléctricas (Nakaoka, et al., 2016, pp. 400-403)

El área de la detección de radiación proveniente de partículas subatómicas, es un área relativamente nueva, y para este tipo de trabajos se han utilizado instrumentos y materiales, cuyo funcionamiento se basa en los principios antes mencionados, sin embargo al día de hoy ya

se están trabajando con materiales menos costosos y que permiten una detección efectiva de partículas de altas energías y otros tipos de radiaciones, ya sea utilizando sistemas colectores de fotones o tubos fotomultiplicadores en conjunto con un complejo sistema electrónico que transforma dichos fotones en señales eléctricas (Vargas, 2016, pp. 92, 93) o utilizando los antes mencionados plásticos centelladores (Rundo, 2013, pp. 82, 83), dichos centelladores, sin embargo, aún se los tienen que adquirir o importar a altos costos pese a que su fabricación presenta un bajo costo.

1.2 Planteamiento del problema

En la actualidad la detección y medición de niveles de radiación generados ya sean por medios tanto naturales como artificiales, se lo realiza mediante el uso de equipos fijos o portátiles, como detectores basados en emulsión nuclear y detectores de tipo gaseosos, como los contadores Geiger Müller (los de mayor uso), los cuales aunque representan una alternativa adecuada, tienen costos excesivos o presentan baja precisión y uso no continuo.

En los últimos años se han venido estudiando diversas materiales sensibles a la radiación que permitan la detección de esta, dentro de los cuales uno de los materiales más prometedores son los centelladores (orgánicos e inorgánicos). Los detectores que utilizan centelladores inorgánicos; como el NaI(Tl), presentan grandes ventajas como su *stopping power*, debido a su alta densidad y alto número atómico, por lo que poseen una mayor intensidad luminosa, sin embargo, su tiempo de decaimiento es del orden de los 300 ns, por lo que no son útiles en la detección de eventos extremadamente rápidos.

Detectores basados en centelladores orgánicos (líquidos o plásticos), presentan tiempos de decaimientos de pocos nanosegundos, por lo cual sus tiempo de respuesta son muy cortos. De esta manera los centelladores plásticos por ejemplo, son útiles para obtener información precisa de tiempos de arribo de partículas cargadas (muones provenientes de rayos cósmicos o partículas alfa provenientes del decaimiento del radón).

Los centelladores plásticos presentan un costo de fabricación bajo, y aunque tienen una baja densidad y bajo número atómico, el problema puede ser solucionado con el dopamiento de estos plásticos centelladores con metales pesados y otros grupos organometálicos para mejorar su eficiencia cuántica (Van Loef, et al., 2015, pp. 64-68), con lo cual estos presentan grandes ventajas y un alto potencial como detectores eficientes y seguros (Dumazert, et al., 2016, pp.181-190). Los detectores de radiación que utilizan centelladores plásticos, son generalmente utilizados en física de altas energías, y de forma particular en la detección de partículas cargadas como

muones e incluso neutrinos, así por ejemplo se puede mencionar la utilización de estos en el calorímetro hadrónico central del ATLAS o el experimento japonés para detección de neutrinos Super-Kamiokande

De igual forma a nivel de laboratorio los centelladores plásticos son utilizados para la detección de rayos cósmicos, es así que el Laboratorio Nacional Fermi (Fermilab), por ejemplo ha desarrollado en los últimos años el proyecto QuarkNet, en el que se ha desarrollado un sistema que permite la detección de muones mediante el acoplamiento entre un plástico centellador, un tubo fotomultiplicador(PMT) y un sistema de adquisición de datos (DAQ), el mismo que en versiones actuales ha sido modificado (Axani, et al., 2016, pp. 1-29) y probado, con resultados exitosos.

Ya que el sistema diseñado consta de plásticos centelladores y dado que estos tienen una gran capacidad para absorber radón (emisor de partículas alfa) (Mitev, 2016, pp. 236-243), se están estudiando métodos mediante los cuales el mismo sistema también permita la detección de partículas cargadas como las alfa y beta provenientes de materiales radiactivos artificiales o naturales (radón), bajo la discriminación de la forma de los pulsos generados (técnica actual más aceptada), permitiendo la construcción de un dispositivo que tenga características similares a equipos comerciales, pero que permita una medición en tiempo real.

1.3 Justificación

La dosis anuales de dosis de radiación a escala global se estima en un 2,4 mSv/ por año, pudiendo dicha dosis variar en función de las condiciones geológicas y medioambientales, bajo las cuales se han registrado valores de hasta 10 mSv/año en ciertas regiones e inclusive llegando a cifras alarmantes de 100 mSv/año, debido principalmente al niveles altos de concentración de radón en el interior de viviendas (Contacto Nuclear, 2011, pp. 16-20).

En base a lo dicho entonces se puede observar una clara necesidad de un monitoreo continuo de los niveles de radón en un ambiente determinado, con miras a generar medidas que permitan la mitigación de dicho problema, ya que a 2009 y según la Organización Mundial de la Salud (WHO por sus siglas en inglés), la exposición a altos niveles de concentración de ^{222}Rn , sería la segunda causa de cáncer de pulmón, después del cigarrillo y la primera causa en personas no fumadoras (WHO, 2009, pp. 21-30).

El diseño de un detector de radiación a base de plásticos centelladores, presenta una alta factibilidad y aplicabilidad, no solo en el ámbito de la detección de radiación de origen cósmico,

sino también en la detección de radiación natural y artificial (radiación proveniente de isotopos radiactivos usados en medicina nuclear y braquiterapia y equipos como aceleradores lineales, rayos x o tomógrafos), radiografía industrial (Gilboy, et al., 2007, pp. 785-787), geofísica entre otros campos.

La medición de los niveles de concentración del radón inclusive, podrían a futuro servir como un precursor para la determinación o predicción de un evento sísmico, como un terremoto (Ashish, 2016, p. 611–627), sin embargo aún no se conoce con exactitud la correlación existente entre los niveles de radón y un evento de dicha naturaleza.

Hacia 1987 en Ecuador ya se llevaba a cabo una investigación sobre la radiometría del radón y las actividades geofísicas (Astudillo Espinosa, 1987) mediante la aplicación de diversos modelos matemáticos, en el que se mencionaba entre otras cosas que existen precursores primarios que preceden a un terremoto, entre ellos existe el Radón 222, como gas que se difunde en el suelo, a partir de la fisuras y grietas generadas tras el rompimiento de las placas tectónicas de la tierra durante este proceso tectónico. En la actualidad y como ya se ha mencionado dicha técnica sigue en proceso de investigación, para lo cual se ocupan gran cantidad de instrumentación y equipos de última tecnología (Instituto de Salud Carlos III, 2017; Kuleshov, 2014, p. 1) con lo cual varios investigadores tratan de probar la hipótesis de que un cambio rápido o brusco en las concentraciones de radón cerca del suelo, podría servir para predecir terremotos (Kagan, 1997, p. 505–525).

Esta investigación se realiza dentro del marco de colaboración de la ESPOCH y la USFQ por ser miembros del Proyecto LAGO (Latin American Giant Observatory) y de la Red Ecuatoriana de Investigación en Astropartículas y Clima Espacial RedERACli y se realizará en las instalaciones del laboratorio de detección de partículas y radiación LEOPARD de la Universidad San Francisco de Quito USFQ.

1.4 Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- Diseñar un prototipo de detector de radiación ambiental utilizando centelladores plásticos.

1.4.2 Objetivos específicos

- Estudiar los últimos avances científicos y tecnológicos en el campo de la detección de radiación natural y artificial
- Identificar las partes de un detector de radiación basado en centelladores plásticos.
- Diseñar el prototipo de detector de radiación a base de un centellador plástico.
- Caracterizar el prototipo de detector de radiación ambiental para los datos obtenidos, mediante el uso de un sistema de adquisición de datos.
- Determinar mediante análisis estadístico, el tipo de radiación que se está detectado.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Radiación Natural

La radiación, tanto ionizante como no ionizante se encuentra presente en todo momento y lugar. El 82% de la dosis de radiación presente en la Tierra es absorbida por los seres humanos (Shahbazi-Gahrouei, et al., 2013, pp. 1-5).

El denominado background de radiación se ve afectado tanto por fuentes de origen natural como artificial (debido a isótopos radiactivos utilizados en campo de la medicina y la industria en general, tales como: ^{137}Cs , ^{131}I , ^{241}Am , entre otros). El background de radiación debido a fuentes de origen natural está constituido principalmente por radiación cósmica, radionucléidos cosmogénicos y la radiación terrestre.

2.1.1 *La radiación cósmica*

Es la radiación proveniente del Sol, explosiones de supernovas o las estrellas, mismas que están compuestas por rayos X y γ , y partículas como mesones, electrones, protones y neutrones, también forman parte de la dosis de radiación de origen natural que recibimos a diario.

La radiación cósmica contribuye en un 15% a la dosis total recibida por fuentes naturales (González, 2011, pp. 41,42), misma que depende en gran medida de la altitud y de la latitud en menor grado. La radiación galáctica es atenuada en las capas superiores de la atmósfera terrestre, mientras que la penetración de partículas cargadas, depende del campo magnético de la Tierra, así se sabe que la protección que brinda la atmósfera y el campo magnético es dos veces menos efectiva en latitudes polares que en el Ecuador.

Según datos del UNSCEAR, los rayos cósmicos a nivel del mar generan una dosis de radiación de 0,27 mSv/año; sin embargo esta dosis tiende a incrementarse con la altitud, ya que a 2,5 km esta es de 0,55 mSv/año, así también por ejemplo a 15 km de altitud y 60° de latitud magnética esta dosis es de 30 mSv/año (UNSCEAR, 2010, pp. 6-13). Al realizar una comparación se podría mencionar que por ejemplo un pasajero de un vuelo de Londres a New York a 10 mil metros de altitud recibirá una dosis de 0,032 mSv, lo cual equivale a una radiografía panorámica dental.

2.1.2 Radionúclidos cosmogónicos

Son los formados tras la interacción de la radiación cósmica con nuestra atmósfera terrestre, mismos que constituyen alrededor de 13 radioinúclidos, dentro de los cuales los más importantes son: el carbono 14, el berilio 7 y 10, sodio 22 y tritio, todos los cuales son emisores β (Piñones, s.f, pp. 1-3); su contribución a la generación de dosis de radiación es mínima.

2.1.3 Radiación terrestre

Está conformada por elementos radiactivos presentes en el agua y corteza terrestre desde el origen de la formación de la Tierra. La mayoría del background de radiación terrestre corresponde al potasio 40 (uno de los 18 radionúclidos también presentes en la corteza terrestre y que decaen en una sola etapa) y los elementos del decaimiento de la serie del Uranio (^{238}U a ^{206}Pb), serie del Torio (^{232}Th a ^{209}Pb), Actinio (^{235}U a ^{207}Pb), procesos en los que se emiten partículas alfa, beta y rayos gama. Siendo que todos los elementos en nuestro medio contienen algún tipo de elemento radiactivo, los rayos terrestres contribuyen con 0,25 mSv/año al total de la dosis de radiación total absorbida por el ser humano.

Los elementos antes mencionados también se pueden hallar en la comida que ingerimos (contienen trazas de emisores alfa) y se ha establecido que los límites aceptables para la presencia de los mismos se encuentra entre 40 y 600 Bq/kg, pero también se pueden encontrar en el aire que respiramos, cuyo principal radioisótopo presente es el radón 222 (^{222}Rn), miembro de la cadena de ^{238}U , sin embargo también se pueden encontrar contaminantes artificiales procedentes de explosiones de bombas atómicas y accidentes nucleares, cuya contribución es mínima

Ya que estadísticamente se ha demostrado que el ser humano permanece el 80% de su tiempo dentro de edificaciones o viviendas, el mismo se ve constantemente irradiado a causa del gas radón (producto de los decaimientos antes mencionados) que emana desde los materiales de construcción que los constituyen y el tipo de suelo sobre el que se encuentra (Piedecausa Garcia, et al., 2011, pp. 40-63), los cuales someten a las personas a una irradiación tanto interna como externa. Ya que las cantidades netas de uranio y torio (series radiactivas desde donde procede el radón) en el manto terrestre se estiman entre 50 a 160 mil millones de toneladas, esta se convierte en la fuente más importante de exposición a la radiación natural (Contacto Nuclear, 2011, pp. 16-20), es de vital importancia tener conocimiento de las áreas que mayor concentración de radón presentan, tanto a nivel mundial y de forma particular en las distintas regiones del Ecuador.

2.2 El radón (Rn)

El radón es un gas radiactivo, menos denso que el aire e incoloro que surge como producto del decaimiento radiactivo de las series ^{238}U (descendiente: ^{222}Rn , con una vida media de 3,8 días), ^{232}Th (descendiente: ^{220}Rn – llamado también Torón, con una vida media de 54,5 s) y ^{234}U (descendiente ^{219}Rn , con una vida media de 3,92 s).

De cada uno de estos isótopos del radón, el de mayor importancia debido a su vida media es del ^{222}Rn , mismo que a su vez es producto del decaimiento del ^{226}Ra , mediante la emisión de partículas alfa para dar origen a isótopos más estables como el Polonio(Po), Bismuto(Bi), Plomo (Pb) y Talio (Tl). A continuación se presenta una tabla en la cual se observan la energía de cada proceso de desintegración mencionada.

Tabla 1-2. Características de los principales decaimientos del ^{222}Rn y ^{220}Rn .

| Radionúclido | Vida media | Tipo de Radiación | $E_{\alpha}(\text{MeV})$ | $E_{\gamma}(\text{MeV})$ |
|-------------------|-------------------|-------------------------|-----------------------------|---|
| ^{226}Ra | 1600 y | α | 4.78 (94.3%) 4.69 (5.7%) | 0.186(83.3%) |
| ^{222}Rn | 3,824 d | α | 5.49 (100%) | |
| ^{218}Po | 3,05 min | α | 6.00 (100%) | |
| ^{214}Pb | 26,8 min | β, γ | | 0.295 (19%) 0.352 (36%) |
| ^{214}Bi | 19,7 min | β, γ | | 0.609 (47%) 1.120 (15%) 1,760 (16%) |
| ^{241}Po | 164 μs | α | | 7.69 (100%) |
| ^{224}Ra | 3,66 d | α | 5.45 (6%) 5.68 (94%) | 0.241(3.9%) |
| ^{220}Rn | 55 s | α | 6.29 (100%) | |
| ^{216}Po | 0,15 s | α | 6.78 (100%) | |
| ^{212}Pb | 10,64 h | β, γ | | 0.239 (47%) 0.300 (3.2%) |
| ^{212}Bi | 1,01 h | α, β, γ | 6.05 (25%) 6.09 (10%) | 0.727 (11.8%) 1.620 (2.8) |
| ^{212}Po | 298 ns | α | 8.78 (100%) | |
| ^{208}Tl | 3,05 min | β, γ | | 0.511 (23%) 0.583 (86%) 0.860 (12%) 2.614 (100%) |

Fuente: Tulsofanidis, 1995, p.96

El radón constituye la fuente natural principal de exposición a la radiactividad (López Muñoz & Iturbe García, 2004, pp. 6-16). Se difunde desde las rocas volcánicas y graníticas y algunos materiales de construcción mediante difusión molecular o convección. No se fija en el organismo pero sus descendientes si lo hacen. El 50% de la exposición natural corresponde a gas radón que se encuentra en el agua que ingerimos y el aire que inhalamos.

2.3 Detectores de radiación ionizante

Todo dispositivo que permita la detección y registro de algún tipo de propiedad: tipo de partícula, energía, carga, corriente, amplitud de pulso, etc., dentro de un campo de radiación ionizante, es conocido como detector de radiación.

Un detector de radiación puede ser clasificado de diferentes formas: activos (cuando se requiere de un sistema electrónico en funcionamiento que permita la detección de la señal mientras se realiza la irradiación) o pasivos (cuando para el registro de la radiación no se requiere un sistema electrónico; sin embargo, una clasificación más aceptable y la cual será aceptada en la presente investigación, será a través de su mecanismo de detección:

Inmediato retardado.

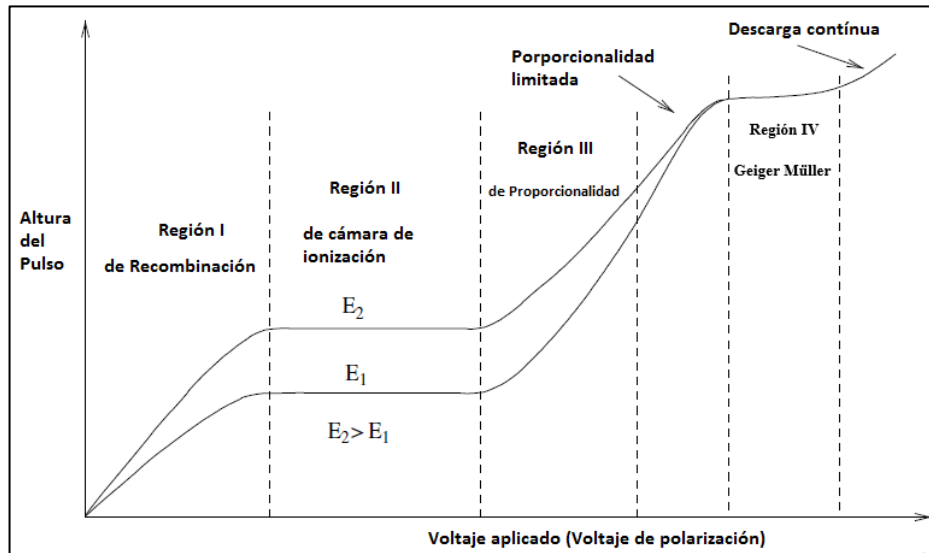
- a) **Detector por ionización:** pueden subdividirse a su vez en función de su tiempo de detección como; inmediato (gaseosos y semiconductores) o retardado (películas fotográficas)
- b) **Detector por excitación:** Al igual que los anteriores tipos de detectores, pueden ser: inmediatos(de centelleo) o retardados(termoluminiscencia)

Otro criterio utilizado para identificar un detector de radiación es el modo de detección; ya que si la señal es producida a través de la ionización en el medio material, el modo de detección es directo (cámara de ionización), mientras que si la señal producida (luz) necesita una posterior conversión a señal eléctrica antes de ser detectada, el modo de detección será indirecto (centellador). Así entonces, es claro que un sistema de detección de radiación a base de centelladores será un detector inmediato por excitación, trabajando en modo indirecto.

2.3.1 Detectores por ionización

Un detector de ionización, consiste de una cámara cilíndrica con paredes lo más delgadas posibles en procura de que la radiación incidente sobre el detector no sea absorbida por ellas, y que encierra un gas determinado o aire, en cuyo interior se halla un electrodo metálico central. Al aplicar una diferencia de voltaje entre las paredes del detector y el electrodo central produciendo un campo eléctrico en el interior del mismo. Al incidir sobre este una partícula cargada o un fotón se producen pares iónicos que son recolectados por el electrodo, generando pulsos eléctricos que son procesados mediante un sistema electrónico.

Debido a la baja densidad de los gases utilizados en un detector de este tipo su eficiencia es baja (típicamente del 1%), comparada a los detectores sólidos. El modo de operación de un detector de ionización depende del voltaje de polarización aplicado, en función de la aplicación para la cual se lo utilice. La figura 1-2, muestra las regiones de operación para un detector de ionización en función del voltaje aplicado.



Gráfica 1-2: Regiones de operación para un detector de ionización

Fuente: Ahmed, 2015, p. 169.

En la región I, existe una alta probabilidad de recombinación iónica ya que al ser tan pequeño voltaje aplicado, los iones y electrones adquieren una velocidad muy baja, así la corriente medida en la salida del detector no puede ser tomada como referente de la energía depositada por la radiación incidente, por este motivo el detector no es usado en esta región. En la región II, un incremento en el voltaje no afecta la corriente medida (corriente de saturación), ya que todas las cargas producidas son recolectadas por el electrodo de forma eficiente, con lo cual dicha corriente será proporcional a la energía depositada por la radiación incidente. En esta región trabajan las denominadas cámaras de ionización.

En la región III, la carga recogida aumenta con el incremento del voltaje, produciéndose con mayor probabilidad una ionización secundaria por efecto de multiplicación, sin embargo la dependencia entre corriente y energía aún se conserva. Al aumentar de forma constante el voltaje se llega posteriormente a una zona de proporcionalidad limitada. Si se sigue incrementando el voltaje se llega a la región IV, en la cual la ionización secundaria, genera un efecto de avalancha de cargas en cada pulso, sin embargo la dependencia de la ionización primaria es perdida en la llamada región Geiger Müller

2.3.1.1 Cámara de ionización

Considerado como un condensador plano-paralelo, en cuya región existe un gas, generalmente aire, generan corrientes muy bajas (entre 10^{-12} y 10^{-2} A), por lo que no son útiles para el contaje de eventos (por partículas α o β). Son más utilizadas para la determinación de campos de radiación generados por rayos X.



Figura 1-2: Detector Electret

Fuente: Radon testing Corporation of America, 2017

Cuando una cámara de ionización es utilizada para la detección de radiación ambiental, proveniente principalmente de radón, se pueden encontrar por ejemplo: detectores Electret, el cual es un material dieléctrico que presenta una carga eléctrica permanente. Las partículas provenientes del decaimiento del radón, producen iones en el interior del dispositivo, que determina cambios en la carga total del material. Este dispositivo puede almacenar información por un periodo de tiempo relativamente largo, es independiente de la humedad debido a su envoltura y es de fácil lectura; sin embargo, sus curvas de respuesta no cubren tasas de dosis muy bajas o muy altas. Adicionalmente también son sensibles a la radiación gamma

2.3.1.2 Contador proporcional

En este tipo de detectores la amplitud de los pulsos es proporcional, tanto a la energía depositada por la radiación incidente como a los voltajes de polarización aplicados. Este tipo de detectores es útil para el contaje de eventos. Son eficaces en la detección de partículas alfa y beta y fotones. Ya que la magnitud de los impulsos de tensión generados son de alrededor de 0.1 V, estos requieren ser sometidos a una etapa de pre amplificación para su posterior lectura.

2.3.1.3 *Detector Geiger Müller*

En un detector Geiger Müller, la amplitud de la señal eléctrica es independiente de la energía y naturaleza de la radiación incidente sobre él. En este tipo de detectores la amplitud de los pulsos puede llegar hasta los 1 V (Alcaraz Baños, s,f) por lo que no se requiere de una etapa de amplificación. Se los utiliza preferentemente en la detección de radiación gama y partículas beta.

2.3.1.4 *Detectores de semiconductores*

Es un tipo de detector gaseoso, en el cual el medio ionizable gaseoso constituye un semiconductor (generalmente de Si o Ge de alta pureza) de alta resistividad. Su principal ventaja es el tener una alta densidad del medio ionizable. La energía necesaria para crear los pares iónicos es hasta 10 veces menor que la de un detector propiamente gaseoso (Ahmed, 2015, pp. 259-314). Aunque un detector a base de semiconductores, presenta mejor resolución y una respuesta más rápida, estos se ven por lo general limitados a tamaños muy pequeños y son susceptibles a la degradación.

2.3.1.5 *Detectores de trazas nucleares de estado sólido (SSNTD)*

Son dispositivos pasivos basados en nitrato de celulosa; los tipos más utilizados de estos detectores son el Cr-39 y el LR-115. Son principalmente sensibles a las partículas alfa que producen destellos visibles, y que pueden ser vistos con un microscopio óptico. Entre algunas de sus ventajas de este tipo de detectores se encuentra el hecho de que son baratos, son sensibles únicamente a partículas alfa, no son afectados por la humedad y las bajas temperaturas y no requieren alimentación eléctrica.



Figura 2-2: Detector de Radón de tipo LR-115 (En la parte central una lámina de LR-115)

Fuente: Parajuli, et al., 2015, p. 30

2.3.1.6 Detectores de carbón activado

Hace uso de la capacidad del carbón para absorber el gas radón, para el análisis de los productos del radón se requiere la espectroscopia gamma. Este tipo de dispositivos son altamente afectados por la humedad, por lo cual su rango de medición solo se extiende de 3 a 5 días (WHO, 2009, p. 24)

| Tipo de detector (Abreviación) | Pasivo/activo | Incerteza típica (%) | Periodo de muestreo | Costo |
|---|---------------|----------------------|---------------------|-------|
| Detector de trazas alfa (ATD) | Pasivo | 10-25 | 1 – 12 meses | Bajo |
| Detector de carbón activado (ACD) | Pasivo | 10-30 | 2 - 7 días | Bajo |
| Cámara de ionización Electret(EIC) | Pasivo | 8-15 | 5 días – 1 año | Medio |
| Dispositivo electrónico integrado (EID) | Activo | ~25 | 2 días – año(s) | Medio |
| Monitor continuo de Radón (CRM) | Activo | ~10 | 1 hora – año(s) | Alto |

*Incerteza expresada para duraciones de exposiciones óptimas ~200 Bq/m³

Tabla 2-2. Dispositivos medidores de gas radón y sus principales características

Fuente: WHO, 2009, p. 22

La tabla 2-2, muestra una comparación entre los diferentes tipo de detectores utilizados en la detección de radón, sin embargo en la misma, el término pasivo se refiere a los tipos de detectores para cuya detección se requiere de una difusión natural de aire al interior del mismo; mientras que el término activo, se refiere a la utilización de un mecanismo que permita el bombeo continuo de aire al interior del detector.

2.3.2 Detectores por Excitación

Este tipo de detectores se fundamentan en los principios de la luminiscencia; fenómeno que se presenta en un determinado material en cual al interactuar con un campo de radiación genera luz ya sea mediante fluorescencia o fosforescencia.

2.3.2.1 Detectores de Termoluminiscencia

Este es quizá el método más utilizado para la detección de radiación y de forma particular de radón (Germanier, et al., s.f, pp. 1-6; Mora Rodriguez & Mora Ramirez, 2006, pp. 21-30) para lo cual se

permite que el radón ingrese al volumen del dispositivo donde se aloja el TLD. Una placa metálica colocada a corta distancia del TLD, puede ser eléctricamente cargada para una mejor eficiencia de colección. Los hijos del radón depositados sobre la placa decaen produciendo energía que se almacena en el TLD, para su posterior lectura.

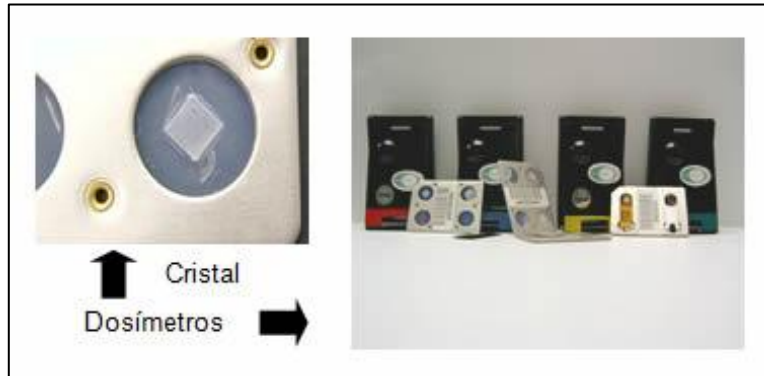


Figura 3-2: Detectores de termoluminiscencia (TLD)

Fuente: infocitec, 2017

Entre los detectores por excitación también encontramos a los detectores de centelleo, dentro de los cuales el más ampliamente utilizado es la celda de centelleo de sulfuro de zinc activada con plata ZnS(Ag), la cual está alojada en un contenedor de metal, los fotones de luz generados por la interacción de las partículas alfa con las celdas son detectadas mediante el acoplamiento con un fotomultiplicador.

2.4 Detectores de Centelleo

2.4.1 Características de un detector de centelleo

Los detectores de centelleo son los instrumentos de detección de radiación más utilizados en física nuclear y de partículas desde hace más de 30 años. Consisten en un material que emite destellos de luz, cuando una partícula o fotones chocan contra este cediendo parte o la totalidad de su energía, dicho material se encuentra acoplado ópticamente a un fotomultiplicador que puede ser un PMT o un SiPM, que transforma la luz recogida en señal eléctrica, la cual es amplificada, procesada y analizada para obtener de ella, información referente al tipo de radiación incidente sobre el material primario.

Un detector de centelleo debe cumplir entre otras, con las siguientes características principales (Leo, 1987, pp. 149-163):

1. **Ser sensible a la energía:** La gran mayoría de los centelladores utilizados para detección de radiación presentan un comportamiento casi lineal, es decir, la amplitud de la señal eléctrica de salida es proporcional a la energía depositada sobre el material centellador.
2. **Tiempo de respuesta rápido:** Al tener un tiempo de respuesta rápido se reduce el tiempo muerto, lo cual permite la diferenciación entre dos eventos continuos. Esta característica es muy útil para la medición de altas tasas de radiación.
3. **Discriminación de la forma de los pulsos:** En este tipo de detectores se aprovecha el fenómeno de la fluorescencia, ya que en un porcentaje alto la energía absorbida por el centellador es reemitida en un tiempo menor o igual a 10^{-8} s (tiempo de transición atómica), lo que permite discriminar la forma del pulso “*pulse shape discrimination* (PSD)”

Bajo las condiciones mencionadas no todos los materiales centelladores pueden ser utilizados como detectores de radiación, estos deben cumplir con ciertas características adicionales:

1. Alta eficiencia de conversión de energía incidente en radiación de fluorescencia.
2. Transparencia a su propia fluorescencia.
3. Emisión dentro de un rango espectral determinado, en función de fotodetector usado (PMT o SiPM)
4. Constante de decaimiento pequeña.

2.4.2 Mecanismo de centelleo

En general el mecanismo a través del cual un material centellador emite luz, es el fenómeno de luminiscencia. Un centellador cuenta con centros de luminiscencia que se encuentran en el gap existente entre la banda de valencia y de conducción, si un electrón en el centro de luminiscencia salta desde el nivel de más alta energía al más bajo, un fotón de centelleo puede ser emitido, sin embargo también existe la posibilidad de transferencias no radiativas, mediante los llamados fonones.

Cuando la radiación pasa por el centellador, un electrón en la banda de valencia salta a la banda de conducción debido a la energía cedida por la radiación incidente, tras esto, dicho electrón produce una carga positiva en la banda de valencia, denominada hueco, y ambos pueden entonces moverse libremente por el material para su recombinación, sin embargo, los siguientes casos pueden darse:

- a) El electrón, que ha decaído desde la banda de conducción a los centros de luminiscencia, puede nuevamente decaer directamente a niveles más bajos de energía de los centros de luminiscencia, con la posterior emisión de luz de centelleo.
- b) El electrón en la banda de conducción puede no saltar directamente a los centros de luminiscencia y caer en las denominadas *electron trap* (estados de energía metaestables formadas por impurezas o defectos del cual el electrón puede salir al ganar energía por agitación térmica), lo cual produce la conocida luz de retraso o fosforescencia

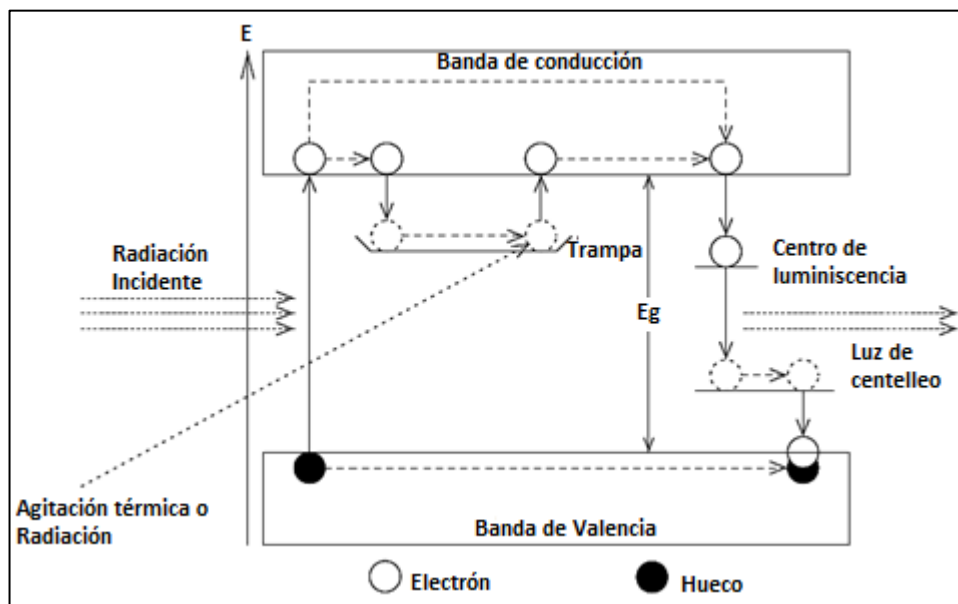


Figura 4-2: Mecanismo de centello

Fuente: Ahmed, 2015, p. 266.

Algunos de los parámetros que se deben analizar para utilizar material de centelleo como medios de detección de radiación son:

a) Producción de luz: si la intensidad de la luz de salida es muy baja, la tasa señal/ruido en el fotodetector puede no ser aceptada. La eficiencia de luz es medida por el número de fotones por MeV de radiación absorbida. Cuando se utiliza un fotodetector como un PMT para detectar la luz de centelleo; la producción total de luz, se obtiene a través de la combinación de la eficiencia del centellador y la del fotocátodo del PMT. En base a consideraciones físicas, de sistemas electrónicos y requerimientos de calibración un umbral de producción de luz es colocado para decidir el tipo de centellador y fotocátodo, este umbral se encuentra entre 5 a 10 fotoelectrones, el mínimo de partículas de ionización. los cuatro factores de los cuales depende la producción de luz son (Ahmed, 2015, pp. 352-360):

b)

- i) El material centellador
- ii) El tipo de partícula incidente
- iii) La energía de la partícula
- iv) La temperatura

La dependencia de la luz de salida con la energía, puede ser modificada, con un cambio en la concentración de impurezas en el material. Dicha dependencia puede degradar la resolución de energía del sistema, un aumento de la energía de la partícula incidente produciría una ampliación en el espectro de energía de los electrones y por consiguiente una ampliación en el espectro de energía que se quiere medir, con lo cual la resolución de energía del sistema se degrada, aspecto que es intrínseco al material centellador.

En términos generales la producción de luz de un centellador plástico (con una eficiencia de 10 veces mayor que el antraceno), se la puede hallar en función de la eficiencia del antraceno (solo de 5%) o el NaI. Además de la producción de luz también se debe tener en consideración el rango de longitudes de onda de los fotones emitidos y la sensibilidad de los fotodetectores.

c) Tiempos de ascenso y decaimiento: Pese a que los tiempo de ascenso de un pulso producido es bastante rápido (1ns), el pulso de decaimiento en ciertos centelladores es más bien lento (desde unos pocos nanosegundos a varios milisegundos), lo cual podría convertirse en un gran problema para el eficiencia total del sistema en campos de alta radiación. Cada material tiene su propio tiempo de decaimiento, mismo que es determinado experimentalmente, en función de su constante de decaimiento, así como del tipo (debido a sus *stopping power* (dE/dx); un mayor *stopping power* llena estados de vida más largos, con posterior emisión de luz de retraso) y energía de la partícula incidente. La constante de decaimiento de un material centellador presenta una proporcionalidad inversa con la temperatura.

d) Extinción (*Quenching*): Describe el efecto de un decremento de la luz de salida de un centellador debido a un cambio en parámetros como: la temperatura, energía de la radiación incidente, impurezas o concentración de sus constituyentes. Así se tiene: Extinción propia del materia (por concentración del flúor primario), extinción por impurezas (impurezas también pueden afectar las propiedades ópticas del material), extinción térmica (luz de salida decrece con un incremento en la temperatura), extinción por energía (depende del *stopping power* del material y afecta más pronunciadamente a los centelladores orgánicos)

e) Densidad y peso atómico: son caracterizados por el *stopping power* del material centellador. La detección de fotones por ejemplo, requiere que el material tenga un alto peso

atómico y densidad, así como también que dicho material sea transparente a los fotones de centelleo.

f) Propiedades mecánicas y estabilidad: Los materiales centelladores son sensibles las condiciones atmosféricas, ya que la humedad y las variaciones de temperatura podrían provocar un deterioro en las propiedades ópticas del material, mientras que variaciones en la presión podrían causar grietas. Por lo cual el uso de centelladores sólidos es más recomendable, siempre que estos sean cortados y pulidos adecuadamente.

g) Propiedades ópticas: una atenuación de los fotones de centelleo en el propio centellador, conduciría a no linealidades en la respuesta del detector. El parámetro óptico a tener en cuenta es el índice de refracción del material para las longitudes de onda de luz emitido por estos. Los fotones ultravioleta (UV) producidos por el centellador tienen longitudes de atenuación muy pequeñas por lo cual dichos fotones son absorbidos en el propio material, razón por lo cual es necesario siempre un segundo flúor, conocido como *wavelength shifter*, los cuales absorben la luz UV producida por el flúor primario y la reemite en el espectro visible.

h) Fosforescencia: este fenómeno causado cuando los electrones caen en la *electron trap* alarga el tiempo de decaimiento del pulso de centelleo, pero también podría producir un resplandor significativo cuando se incrementa la temperatura. Un electrón que se encuentre en una *electron trap* puede saltar nuevamente a la banda de conducción, por medio del suministro de energía térmica, proceso que es aprovechado en ciertos materiales, para aprovecharlos en los llamados detectores de termoluminiscencia (TDL).

i) Dependencia con la temperatura: tanto la producción de luz como la constante de decaimiento presentan una dependencia con la temperatura.

j) Daños por radiación: detectores centelladores son propensos a daños en ambientes de alta radiación, actualmente sin embargo, existen materiales aún más resistentes a altas tasas de radiación. Los centelladores líquidos son los menos susceptibles a la radiación, mientras que los centelladores plásticos son altamente propensos a daños producidos por altos campos de radiación.

k) Eficiencia de centelleo: representa el cociente entre la energía total de los fotones de centelleo y la energía total depositada por la radiación incidente:

$$\eta = \frac{\text{Energía total de los fotones de centelleo}}{\text{Energía total depositada por la radiación incidente}} \quad [1]$$

$$\eta = \frac{E_s}{E_i} \quad [2]$$

La eficiencia de centelleo de la mayoría de los centelladores es pobre, pudiendo llegar hasta un 30%, debido a que gran parte de la energía entregada por la radiación incidente es perdida en agitación térmica y transiciones no radiativas. Sin embargo, la luz de salida producida por uno de estos centelladores es suficientemente alta para obtener una buena tasa señal/ruido.

2.5 Tipos de centelladores

Dadas las condiciones indicadas anteriormente encontramos los siguientes tipos de centelladores:

2.5.1 Centelladores orgánicos

Son hidrocarburos aromáticos con estructuras de anillos bencénicos. Presentan tiempos de decaimiento de pocos nanosegundos. En este tipo de materiales el centelleo se produce mediante transiciones de electrones de valencia libres a moléculas ubicadas en los orbitales π .

2.5.1.1 Cristales orgánicos

Los centelladores de este tipo que más se utilizan son el antraceno ($C_{14}H_{10}$), mismo que tiene la más alta salida de luz de todos los centelladores orgánicos, pero es el de mayor tiempo de decaimiento, trans-estilbena ($C_{14}H_{12}$) y el Naftaleno ($C_{10}H_8$), para el caso de estos dos últimos presentan tiempos de decaimiento de pocos nanosegundos (Leo, 1987, p. 154). Estos centelladores presentan una respuesta en amplitud anisotrópica, es decir, que dicha respuesta varía con la orientación del cristal. Una gran ventaja a destacar es que son duros y durables, sin embargo, el corte en diversas formas es una tarea compleja.

2.5.1.2 Líquidos orgánicos

Compuestos por uno o más centelladores orgánicos en un solvente orgánico. La energía absorbida por el solvente (xileno, tolueno, benceno, fenilciclohexano, trietilbenceno) pasa al soluto centellador (p-Terpenil, PBD, PPO, POPOP), en ocasiones la eficiencia de este tipo de centelladores aumenta con un aumento en la concentración de soluto dependiendo de la

aplicación para la cual será utilizado; sin embargo, una saturación de este genera el efecto de *quenching* en el centellador. Algunos de los líquidos orgánicos más utilizados en la detección por ejemplo de partículas alfa son: NE 216, NE221 y NE 233 (Ahmed, 2015, p. 357).

Las concentraciones típicas para un líquido orgánico son de 3g de soluto por litro de solvente, con un tiempo de decaimiento de 3 a 4 ns. Una de las desventajas de este tipo de centellador es su alta sensibilidad a impurezas en el solvente, con lo cual se produce una reducción en su eficiencia.

2.5.1.3 Centelladores plásticos

Son soluciones de centelladores orgánicos pero en solventes plásticos sólidos (poliviniltolueno, polifenilvenceno y el poliestireno), de igual forma como en los líquidos orgánicos pueden ser utilizados como solutos o también llamados como *wavelength shifters*, el PDB, p-Terpenil, PBO y el POPOP en concentraciones de 10g/L.

Este tipo de centelladores tienen un tiempo de decaimiento rápido de entre 2 y 3 ns y una alta salida de luz (Tsoufanidis, 1995, p. 221). Entre sus ventajas destacan su fácil manipulación y el bajo costo de producción. Comercialmente se los puede encontrar en formas desde finas láminas hasta bloques y cilindros. Son resistentes al agua, grasa de silicona y alcoholes bajos. En determinados casos se deben utilizar guantes de algodón para su manipulación, ya que ciertos ácidos del cuerpo humano pueden causar agrietamientos.

2.5.1.4 Centelladores gaseosos

Se utiliza gases nobles como el xenón, kriptón, argón y helio por lo cual se requiere que el sistema trabaje bajo grandes presiones (Ahmed, 2015, p. 361). Estos tipos de centelladores tienen tiempos de decaimiento de 1ns; sin embargo, su desventaja más evidente es que emiten luz en el rango del ultravioleta, región en la cual la mayoría de los tubos fotomultiplicadores son ineficientes. Para solucionar este tipo de problemas se puede adicionar al igual que en los plásticos centelladores un *wavelength shifter* como el difenilestilbeno (DPS).

2.5.1.5 Vidrios orgánicos

Se los utiliza principalmente en la detección de neutrones, partículas β y rayos γ . Constituyen silicatos de boro o litio dopados con cerio. Son utilizados por su alta resistencia a casi todos los agentes orgánicos e inorgánicos y también por sus elevados puntos de vaporización, que los

hacen útiles bajo condiciones ambientales extremas. Aunque sus tiempos de decaimiento se pueden comparar con las de los plásticos o cristales inorgánicos (de solo unas decenas de nanosegundos), su salida de luz es de tan solo un 25 a 30% del antraceno.

2.6 Detectores de radiación con centelladores plásticos

2.6.1 Centellador plástico

Un centellador plástico es obtenido al añadir un centellador primario (al 1% en peso de la mezcla total) a una mezcla homogénea de generalmente monómeros de acrílico, poliestireno o poliviniltolueno, que posteriormente será polimerizada a plástico. Un segundo centellador es añadido (0,05% en peso de la mezcla total) con la finalidad de absorber los fotones UV provenientes del primario y reemitir fotones de luz visible, generalmente en la región del azul. Las propiedades ópticas y de centelleo, pueden ser ajustadas mediante un cambio en la concentración del flúor primario y/o secundario.

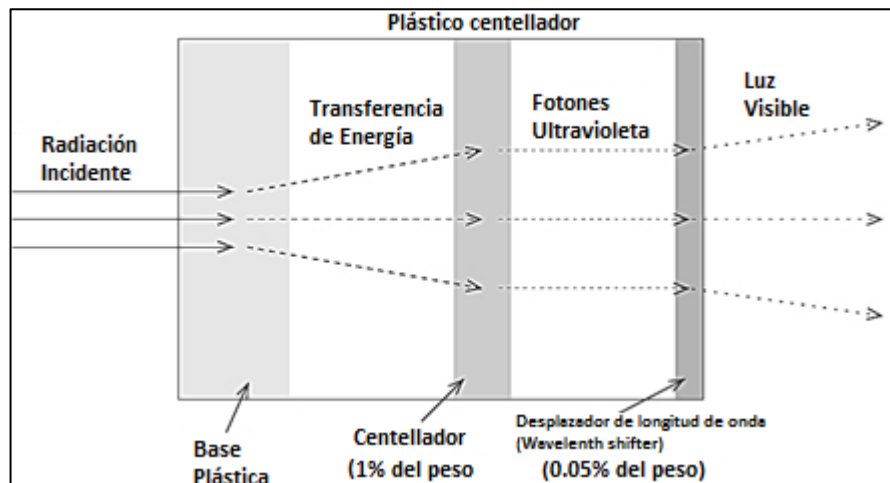


Figura 5-2: Configuración de un centellador plástico

Fuente: Ahmed, 2015, p. 332

La base plástica en general es un medio de transferencia de energía, en la cual la energía absorbida desde la radiación incidente se transfiere al flúor primario mediante interacciones dipolo-dipolo, proceso que es conocido como transferencia de energía Förster.

Algunas de las ventajas de un centellador plástico son:

- Estabilidad química
- Alto grado de homogeneidad óptica

- c) Puede ser cortado y manipulado virtualmente en cualquier forma

Entre las desventajas de un centellador plástico se tienen:

- a) **No linealidad de la luz de salida:** la luz de salida por unidad de longitud, tiene una dependencia no lineal sobre la energía perdida por unidad de longitud del trayecto de las partículas, dada por la fórmula de Birks:

$$\frac{dL}{dx} = \frac{AdE/dx}{1+k dE/dx} \quad [3]$$

Donde: dL/dx , representa la luz de salida por unidad de longitud; dE/dx , la energía perdida por la partícula por unidad de longitud, A es la eficiencia de centelleo absoluta y k es un parámetro que relaciona la densidad de los centros de ionización a la energía perdida

- b) **Retraso de la fluorescencia:** emisión de luz de retraso o resplandor debido a la presencia de componentes de larga vida que no decaen exponencialmente
- c) **Dependencia de la producción de luz con la presión:** la producción de luz de un centellador plástico puede decaer hasta un 10% con un incremento de en la presión parcial del oxígeno y otros gases del ambiente.
- d) **Dependencia de la producción de luz con el campo magnético:** un centellador plástico presenta una dependencia no lineal con el campo magnético. Este efecto no es significativo.
- e) **Decremento de la producción de luz con el tiempo**
- f) **Inestabilidad mecánica:** ciertos centelladores plásticos presentan estructura frágil, lo cual puede producir grietas en el mismo y una posterior degradación de sus propiedades ópticas.
- g) **Vulnerabilidad a elementos extraños:** aceite, polvo y otros pueden degradar las propiedades ópticas y químicas de un centellador plástico.
- h) **Vulnerabilidad a daños por radiación**

Así en términos generales la producción de luz de un centellador plástico depende de:

- a) El tipo de material
- b) El tipo de radiación
- c) La energía de radiación
- d) La temperatura y;
- e) La presión

La longitud de atenuación de la luz de centelleo en todo el material centellador se ve afectado por las dosis acumuladas de radiación, lo cual conlleva a un deterioro en la transmisión de la luz.

2.6.2 Partes de un detector de radiación a base de centelladores plásticos

Como ya se mencionó el uso de un centellador plástico en la detección de diferentes tipos de radiación, es factible por diferentes medios, y para lo cual se requiere básicamente de dos componentes adicionales que son: los medios detectores de luz emitidos por el centellador, para lo cual se usa un tubo fotomultiplicador (PMT, relativamente costosos) o los actuales detectores de silicio (SiPMs, ocupan menor espacio y son considerablemente menos costosos que los anteriores) y por otro lado la electrónica asociada para el registro y análisis de datos obtenidos tras una etapa de pre amplificación y amplificación de las señales(pulsos) generadas por el fotodetector. A continuación se detalla de forma rápida el funcionamiento de este tipo de componentes.

2.6.2.1 Fotomultiplicadores de Silicio (SiPM)

La luz emitida cuando una partícula viaja a través del centellador debe ser observada usando un dispositivo de recogida de luz. Tradicionalmente, se adhiere el centellador a los tubos fotomultiplicadores (PMT). Estos son grandes, requieren altos voltajes, y son caros.

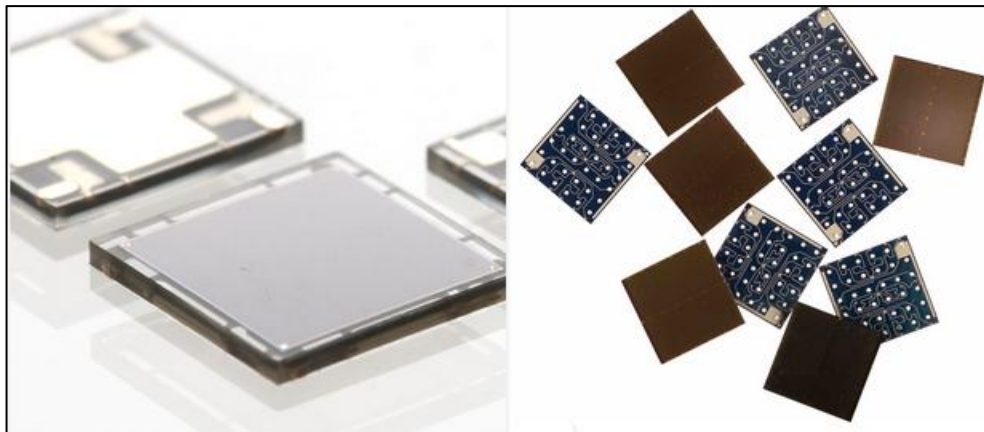


Figura 6-2: Fotomultiplicadores de Silicio (SiPM), modelos de la serie C y J

Fuente: SensL, 2017

Con la finalidad de reducir los inconvenientes antes mencionados se pueden utilizar también los de nominados fotomultiplicadores de silicio (SiPMs), ya que requiere sólo un bajo voltaje de polarización inversa (voltaje positivo al cátodo, Negativo al ánodo), tiene un pico de sensibilidad en la región azul donde la mayoría de los centelladores emiten la mayor parte de su luz, y es sólo unos pocos milímetros de espesor con un área de sección transversal igual al tamaño del fotocátodo (Axani, et al, 2016, pp. 1-60). El bajo sesgo inverso significa que se puede utilizar un convertidor DC-DC económico de bajo consumo para alimentar el circuito.

Un SiPM consiste en un gran número de micro celdas compuestas cada una por uniones de silicio P-N. Los electrones migran hacia el lado P y los huecos emigran hacia el lado N. Esto crea una región conocida como la "región de deflexión", donde los electrones y los huecos se eliminan mediante la recombinación. Cuando un fotón atraviesa la región deflexión, puede depositar suficiente energía para que un electrón en la banda de valencia sea movido a la banda de conducción, creando así una corriente. El fotón que produce un único par electrón hueco puede producir una señal muy grande y medible. Los SiPMs tienen una tasa de señal/ruido muy alta.

2.6.2.2 Sistema de Adquisición de datos (DAQ)

Una vez que la señal proveniente del centellador, la señal debe atravesar por etapas de pre-amplificación y amplificación mediante diversos circuitos; mismos que pueden ser integrados en tarjetas electrónicas de procesamiento de datos (presentadas en la figura) tales como: Arduino; tarjeta electrónica que puede procesar señales eléctrica analógicas (PWM) para convertirlas en analógicas (Axani, et al., 2016, pp. 1-60), Raspberry Pi; una minicomputadora con la cual se puede realizar la colección de datos (Anon., s.f., pp. 25-30) , QuarkNet; una tarjeta electrónica de adquisición de datos (DAQ, por sus siglas en inglés) mediante un conversor TDC (time-to-digital converter, QuarkNet), (Rundo, 2013, p. 63), (Rylander, et al., 2010, pp. 14-17).

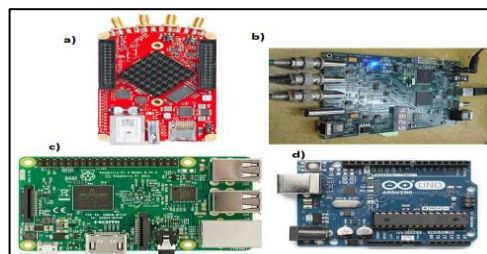


Figura 7-2: Diferentes tarjetas electrónicas para la recolección y adquisición de datos: a) Red Pitaya, b) OuarkNET DAO. c) Raspberrv Pi.

Fuente: redpitaya.com, 2017; raspberrypi.org, 2017; arduino.cc, 2017; Rylander, et al., 2010, pp. 14

También se pueden utilizar tarjetas electrónicas comerciales como Red Pitaya, una tarjeta que combina un sistema de adquisición de datos, generación de señales, un micriprocesador y una FPGA.

2.7 Monitoreo de radiación ambiental mediante detectores a base de centelladores plásticos

Si se desea utilizar un centellador plástico para la detección de partículas alfa, este plástico debe ser suficientemente fino, ya que el rendimiento incrementa con un decremento en el número atómico de los iones (Knoll, 1999, pp. 193-210). Debido a que una lámina fina de plástico centellador (espesor aproximado de 50 μ m) presenta una alta eficiencia en la detección de partículas alfa (Yamamoto & Iida, 1998, pp. 387-393), estos son útiles en la detección de partículas alfa provenientes del decaimiento del gas radón. Un centellador plástico puede ser usado para, en combinación con un fotodetector (PMT o SiPM) medir el espectro de radiación proveniente de partículas alfa.

Para el monitoreo de partículas alfa los detectores más utilizados son los detectores con centelladores de ZnS(Ag). El monitoreo de las partículas alfa y beta es difícil debido a su bajo rango y a que la gran mayoría de ellas son absorbidas en la ventana de entrada de los detectores (Yamamoto & Hatazawa, 2011; Yamamoto, et al., 1999). Se debe tener en consideración además que la colección electrostática de los descendientes del decaimiento del radón depende de humedad del aire (Dua, et al., 1983). Diversos estudios demuestran que para utilizar centelladores plásticos para la detección de radiación, tales como partículas alfa o beta, se debe utilizar la técnica de la discriminación a través de la forma del pulso que estos generan (Mitev, 2016, pp. 236-243).

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1 Métodos y técnicas

3.1.1 *Tipo de investigación*

La presente investigación fue de tipo experimental y descriptivo, ya que tras el montaje del sistema de detección de radiación, se procedió a la toma y recolección de datos para su posterior procesamiento de mediante scripts desarrollados en C++ y ROOT. Todo lo cual fue llevado a cabo en el Laboratorio de detección de partículas y radiación LEOPARD de la Universidad San Francisco de Quito.

3.1.2 *Materiales*

A continuación se detallan de forma breve las características de los componentes utilizados para la construcción del prototipo de detector de radiación, así como el tratamiento de los mismos durante el montaje experimental del prototipo.

3.1.2.1 *Centellador Plástico*

El centellador plástico (paleta de plástico centellador) utilizado fue el EJ-200, que presenta un tiempo de decaimiento de 2,1 ns y otras características que se presentan en el anexo A. Las paletas tuvieron dimensiones 25x25x1cm. En una primera fase se realizó la detección de radiación utilizando un solo canal de la QuarkNet DAQ, por lo cual se requirió únicamente una sola paleta. Con la finalidad de trabajar en el análisis de datos mediante coincidencias y anti coincidencia de eventos, posteriormente se utilizaron dos paletas más con las mismas características mencionadas.

Ya que al trabajar únicamente con las paletas, el tipo de radiación corresponde mayormente a la detección de muones (Rylander, et al., 2010, pp. 12-24) ; se utilizaron fuentes radiactivas en contacto con dichas paletas, con la finalidad de poder obtener diferencias entre los espectros de energía o las forma de los pulsos generadas. La tabla 1-3, muestra las fuentes radiactivas utilizadas, así como sus actividades.

Tabla 1-3: Fuentes radiactivas utilizadas en la fase experimental

| Fuente Radiactiva | Actividad | Tiempo de decaimiento | Tipo de emisor |
|-------------------|-----------|-----------------------|----------------|
| ^{241}Am | 15 nCi | 432,2 años | Alfa |
| ^{90}Sr | 75 kBq | 28,8 años | Beta |
| ^{137}Cs | 400 kBq | 30,23 años | Beta y Gama |

Realizado por: Luis Guallichico, 2017

3.1.2.2 Fotomultiplicador de Silicio (SiPM)

Se utilizó un SiPM SensL de la serie C, mismo que presenta bajo ruido, es rápido y sensible a la luz azul, con similares características a un PMT convencional. El modelo es un MicroFC-60035-SMT (SensL, s.f.), de 6mmx6mm, como se puede observar en la figura, con un punto de trabajo de 30 mV. Se utilizaron 3 SiPM, uno por cada paleta de centellador plástico

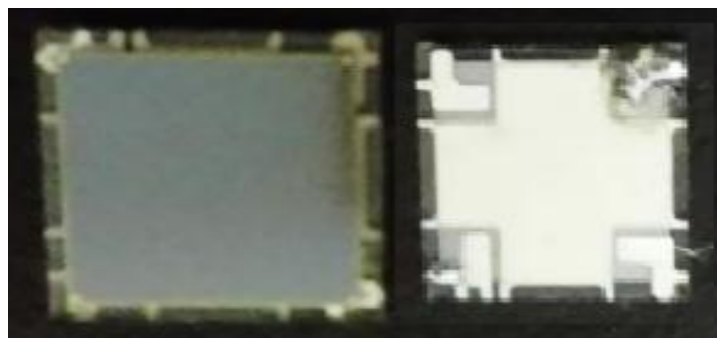


Figura 1-3: SiPM utilizado modelo: MicroFC-60035-SMT

Realizado por: Luis Guallichico, 2017

3.1.2.3 Tarjeta de polarización

Es una tarjeta modular con 8 canales de entrada, pudiendo polarizarse hasta 8 SiPM de manera independiente, Esta tarjeta electrónica consta de un bloque de amplificación de las señales de entrada (pulsos), en un orden de 10 veces en función del voltaje de la señal de entrada (Talavera & Cazar, 2017, p. 3). Este sistema de polarización provee de un voltaje de 45 V, sin embargo, por razones de seguridad debido al modelo de SiPM utilizado y en función de sus especificaciones, este es limitado a 30 V.

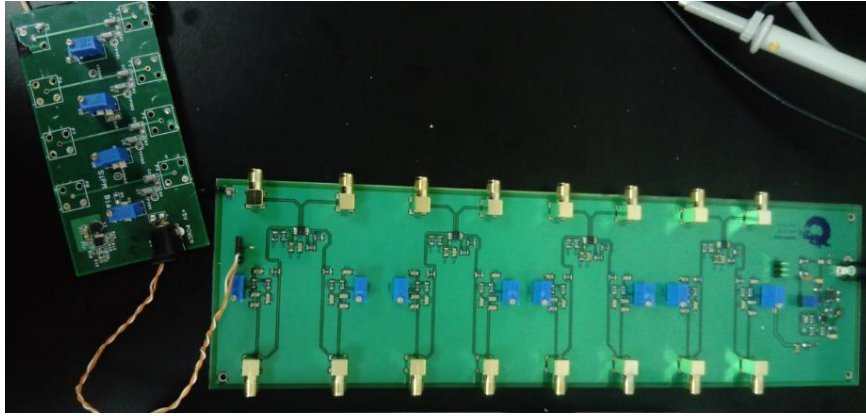


Figura 2-3 : Tarjeta de polarización de los SiPM

Fuente: Talavera & Cazar, 2017

Para un adecuado funcionamiento de los SiPM, se debe encontrar su punto de trabajo óptimo, es decir; hallar el valor de voltaje de polarización en el cual el número de eventos detectados sea independiente del voltaje suministrado al SiPM. Dicho voltaje fue hallado mediante el proceso de calibración (Anexo B) de cada una de las paletas utilizadas; este valor se encontró en un rango de 27.5 y 27.75 mV

3.1.2.4 *QuarkNet DAQ*

Se utilizó la tarjeta QuarkNet DAQ serie 6000, que es una tarjeta electrónica con cuatro canales de adquisición de datos a los cuales fueron conectados las señales de salida de provenientes de la tarjeta de polarización por medio un cable BNC, que permite reducir la tasa de ruido propia de dicha electrónica. Esta tarjeta cuenta además con entradas para sensores de presión, temperatura y cuenta con un GPS. Cada uno de los componentes de la DAQ se encuentra detallados brevemente en el anexo. Una característica principal de la DAQ es que permite el trabajo a través de discriminadores de tiempo de generación de pulsos. Los convertidores digitales de tiempo (TDCs por sus siglas en inglés: Time-to.Digital Converters) miden el tiempo de inicio del borde frontal del pulso generado (*Leading edge* – TDC LE) en una de las paletas y el tiempo de finalización o borde posterior del mismo pulso (*trailing edge* – TDC TE), dichos tiempos son guardados en el DAQ con intervalos de 1.25 ns (Rylander, et al., 2010, p. 23).

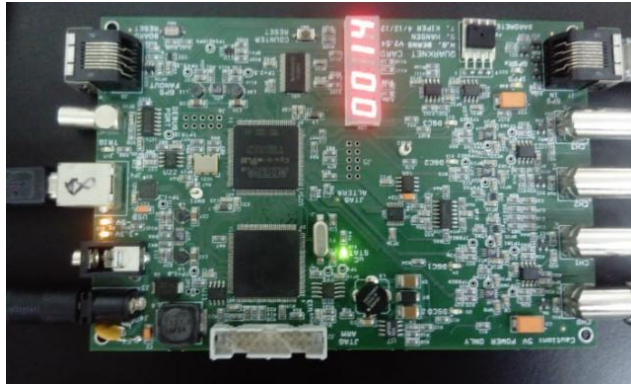


Figura 3-3: QuarkNet DAQ serie 6000

Realizado por: Luis Guallichico, 2017

Se determina un voltaje umbral (*Threshold*) para implementar un sistema de discriminación de eventos (ya que el alto del pulso es proporcional a la energía depositada); cuando este criterio es satisfecho los TDCs son generados y almacenados para cada uno de los canales de la DAQ. Esto permite obtener la anchura del pulso detectado por el fotomultiplicador, es decir el tiempo que dicho pulso permaneció sobre el voltaje umbral conocido como ToT.

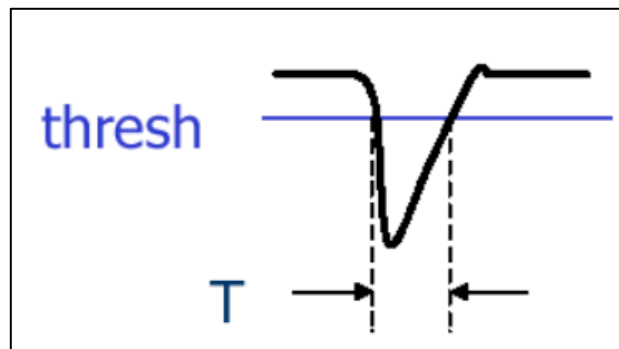


Figura 4-3: Pulso típico de un PMT, a partir del cual el ToT puede ser determinado

Fuente: Rylander, et al., 2010, p. 17

El ToT entonces es una estimación del área descrita por el pulso y por lo tanto se su energía. Así entonces se puede decir que partículas más energéticas presentarán un mayor ToT.

Luego de una corrida de datos la DAQ genera un archivo como el indicado en la figura. Este archivo contiene 16 columnas y cada fila representa un evento registrado. Las columnas 1-10 se encuentran generados en formato hexadecimal. La información representada por cada columna se encuentra detallada en el anexo C. En el presente trabajo tomaremos en consideración las columnas 2-9 ya que ellas contienen la información referente a los tiempos de inicio y finalización de un pulso registrado, es decir; el TDC_LE y el TDC_TE.

```

VI
Run Mode      : Off          CE (cnt enable), CD (cnt disable)
Ch(s) Enabled : 0           Cmd DC  Reg C0 using (bits 3-0)
Veto Enable   : Off          VE 0 (Off), VE 1 (On)
Veto Select   : Ch0         Cmd DC  Reg C0 using (bits 7,6)
Coincidence 1-4: 1-Fold     Cmd DC  Reg C0 using (bits 5,4)
Pipe Line Delay: 100 nS     Cmd DT  Reg T1=rDelay  Reg T2
=wDelay 10nS/cnt
Gate Width    : 1000 nS     Cmd DC  Reg C2=LowByte  Reg C3
=HighByte 10nS/cnt
Veto Width    : 0 nS        Cmd VG  (10nS/cnt)
Ch0 Threshold : 0.030 vlts  Voltaje umbral para
Ch1 Threshold : 0.030 vlts  todos los canales
Ch2 Threshold : 0.030 vlts
Ch3 Threshold : 0.030 vlts
Test Pulser Vlt: 3.000 vlts
Test Pulse Ena : Off

CE      LE  TE      Para el canal 0 de adquisición de la DAQ
D77B10F7 A0 00 00 00 00 00 00 00 00 00 D6B768F0 165451.643 230917 V 00
0 +0042
D77B10F8 00 3E 00 00 00 00 00 00 00 00 D6B768F0 165451.643 230917 V 00
0 +0042
D7A86AFF AF 00 00 00 00 00 00 00 00 00 D6B768F0 165451.643 230917 V 00
0 +0042

```

Figura 5-3: Archivo con extensión .DAT generado por la DAQ

Realizado por: Luis Guallichico, 2017

Aunque la DAQ puede ser conectada a una computadora de escritorio o una laptop, se requiere un emulador de su entorno, razón por la cual para el presente prototipo se decidió utilizar una Raspberry Pi, la cual es una computadora en placa reducida que utiliza mayoritariamente sistemas operativos en GNU/Linux. La conexión con la DAQ se realiza mediante puerto USB y su comunicación se la realiza mediante comandos que se explicarán posteriormente. La información generada por la DAQ es almacenada en una micro SD extraíble.

3.1.2.5 C++ y ROOT

Para el procesamiento de la información se utilizó ROOT, en su versión 6.10; este es un *framework* para el procesamiento de datos diseñado por el CERN. ROOT permite el manejo de archivos con una gran cantidad de información como lo es el presente caso. Utiliza un lenguaje de programación basado en C++, pero también consta de métodos y clases propios. En el presente trabajo aplicaremos dicho lenguaje de programación mediante la utilización de “desempaquetador” de Federico Izraelevitch (físico argentino miembro del “Proyecto Escaramujo”; una serie de cursos de laboratorio sobre instrumentación de física de altas energías y astropartículas pensados para que distintas universidades de toda la región pudieran iniciarse en el uso de equipamiento para la detección de rayos cósmicos), el cual contiene un script que permite procesar la información arrojada por el DAQ en formato hexadecimal y genera un conjunto de histogramas referentes a los TDC_LE y TDC_TE de los eventos detectados

3.1.3 Diseño experimental

El prototipo de detector de radiación, estuvo conformado por un plástico centellador acoplado a un SiPM, mismo que para una primera fase se lo colocó dentro de una caja oscura que permitió el aislamiento de la luz exterior. La imagen 10 muestra el montaje inicial del prototipo de detector de radiación. Es importante que tanto el plástico centellador como el SiPM se encuentre los más aislados posible de la luz exterior, para evitar que el SiPM se sature. Para cada uno de los diseños experimentales la tasa de ruido se encontraba en un valor < 20 mV; así, voltaje umbral para cada corrida de recolección de datos se estableció en 30 mV, permitiendo el registro de eventos con amplitudes superiores al voltaje umbral indicado. Por otra parte la amplitud máxima de los pulsos detectados estuvo establecida en valores de hasta 200 mV, todo lo cual pudo ser registrado visualmente mediante un osciloscopio.

Fuera de la caja el SiPM se encuentra conectado a un circuito de polarización, explicado anteriormente, que alimenta al mismo con un voltaje de 30 V, debido al modelo de SiPM utilizado. La señal detectada por este es direccionada hacia la Quarknet, que inicialmente permite conocer el número de cuentas mediante un display integrado a ella para un determinado tiempo de toma de datos, generando el archivo antes mencionado que será utilizado para su posterior análisis mediante ROOT y C++. La recolección de los datos para la primera fase fue realizada por el lapso de una hora, ya que el tiempo de decaimiento de las fuentes es grande, como se muestra en la tabla 1-3.

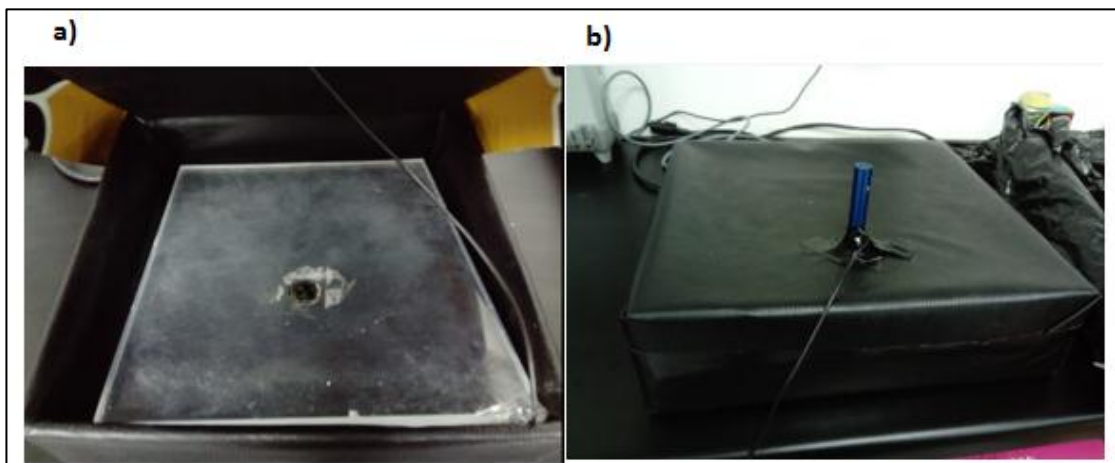


Figura 6-3: Configuración inicial del prototipo de detector de radiación: a) plástico centellador en contacto con la fuente de ^{241}Am y b) plástico centellador en contacto con la SiPM.
Realizado por: Luis Guallichico, 2017

En una segunda fase (figura 7-3), se utilizaron 3 paletas de plástico centellador, a dos de las cuales se las aisló de la luz cubriéndolas con *tyvek* (fibra de polietileno de alta densidad, que permite el aislamiento de un medio y sirve como material reflectante opaco; evita que los

fotones de luz generados tras la interacción de un muon con el plástico centellador escapan del mismo, ya que este sirve como material reflejante) y cinta adhesiva negra que evita el ingreso de luz exterior, lo cual contaminaría la señal detectada.

La tercera paleta fue nuevamente colocada dentro de la caja oscura en contacto con una fuente radiactiva. Tras esto se realizó la adquisición de datos por el lapso de una hora, pero en esta ocasión con la activación de los tres canales de adquisición y para cero, una y dos coincidencias.

Las coincidencias se refieren a que en un arreglo de dos o tres paletas debido a que partículas como los muones, las cuales viajan a velocidades relativistas; si la partícula es detectada en una de las paletas, esta deberá también ser detectada en alguna de las otras paletas dentro de una ventana de tiempo establecida en aproximadamente 40 ns (Rundo, 2013, p. 84).

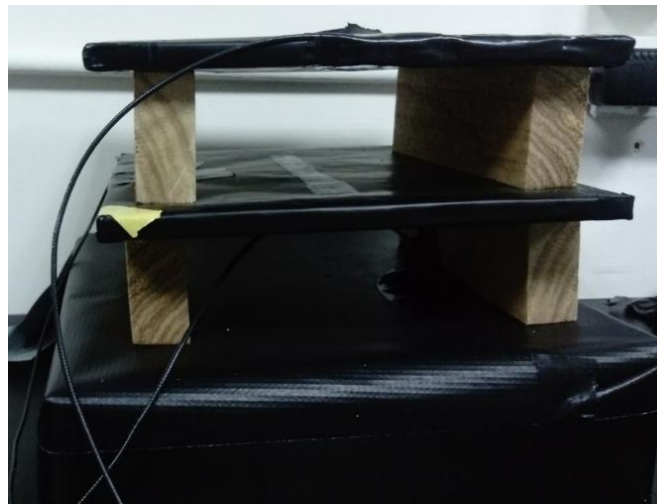


Figura 7-3: Disposición experimental para la segunda fase de recolección de datos con fuentes

Realizado por: Luis Guallichico, 2017

De esta forma si la partícula es detectada por las dos o las tres paletas al mismo tiempo esta corresponderá a la detección de un muón, mientras que si el evento es detectado únicamente en la paleta que se encuentra en contacto con la fuente radiactiva esta posiblemente de deba a la detección de una partícula α o β o un fotón γ .

3.1.4 Adquisición de datos

3.1.4.1 Adquisición desde la QuarkNet

Para iniciar con la adquisición de datos mediante la DAQ, se debe establecer un Threshold (voltaje umbral) que permita eliminar la mayor cantidad de ruido producido ya sea por la electrónica utilizada o por el inadecuado aislamiento del sistema de la luz exterior; para lo cual se utilizó un osciloscopio, que permitió determinar que el valor de Threshold fue de 30 mV.

El tiempo de adquisición para cada uno de los arreglos experimentales fue de 30 minutos, puesto que se trabajó con fuentes radiactivas cuya emisión es constante. Para cada arreglo experimental las fuentes estuvieron siempre en contacto con el centellador. Tanto para la primera fase (fuentes en contacto con una sola paleta) al utilizar la DAQ, como para la segunda fase (utilización de tres paletas y sistema de coincidencias), el voltaje umbral fue de 30 mV. Los comandos utilizados para cada fase se describen en el anexo D.

3.1.4.2 Adquisición desde el osciloscopio

Para la adquisición de los datos de forma directa desde el osciloscopio se hizo uso de un programa desarrollado en *Labview* (software de ingeniería de sistemas que requiere pruebas, medidas y control con acceso rápido a hardware e información de datos) (Talavera & Cazar, 2017, p. 3), mediante el cual los pulsos generados y observados en el osciloscopio fueron guardados al mismo tiempo en un archivo en formato .txt con los valores de los voltajes para cada uno de los diseños experimentales antes mencionados que servirán para la posterior reconstrucción de la forma de los pulsos. De igual manera el tiempo de adquisición de datos fue de forma 30 minutos. Los archivos generados posteriormente fueron exportados a Matlab para su posterior análisis.

3.1.5 Análisis de los datos obtenidos

3.1.5.1 Datos de la QuarkNet

Los archivos generados por la QuarkNet (archivos con extensión .dat), fueron procesados mediante el “desempaquetador” de Federico Izraelevitch; este script permite convertir la información contenida en las columnas 2-9 de dicho archivo, que se encuentran en formato hexadecimal, transformándolos a decimal y generando histogramas de TDC, tanto para el borde

frontal, como posterior de los eventos registrados por cada una de las paletas en su respectivo canal de adquisición. Los pasos para realizar este proceso se describen en el anexo E.

En la electrónica de la QuarkNet un evento, se constituye en una ventana de tiempo en la cual uno podría tener la presencia de varios pulsos. Los TDC_LE y TE son arreglos, es decir son vectores, que guardan los tiempos en los cuales se producen los bordes frontales y finales de cada evento, mientras que el sizeTDC representa el número de hits, o pulsos, que hubo en ese evento (ventana de tiempo).

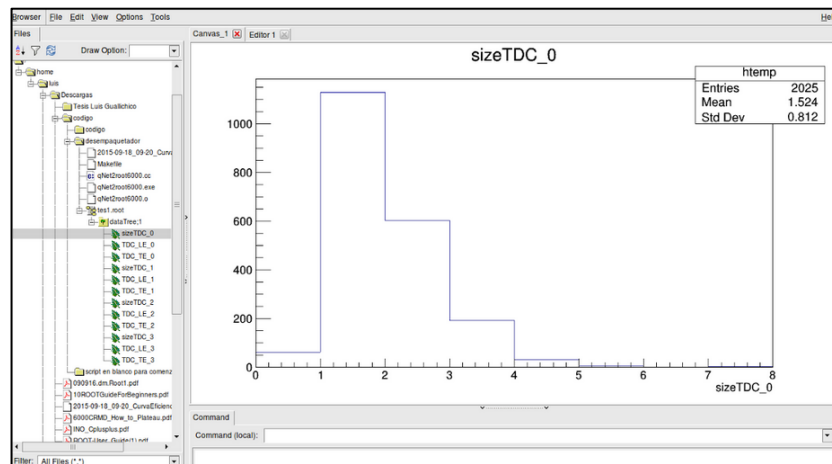


Figura 8-3: Tree de ROOT que contiene los TDC_LE y TDC_TE

Realizado por: Luis Guallichico, 2017

Mediante el análisis de los tiempos sizeTDC y TDC_LE y TE, se pueden inferir inicialmente diferencias entre el número de eventos registrados en una ventana de tiempo así como también ligeras diferencias en los tiempos para los borde de los pulsos registrados generados ya sean por partículas cargadas o fotones. Sin, embargo ROOT cuenta con diferentes clases y métodos que permiten realizar análisis correlacional o un análisis más profundo entre los datos contenidos en las branches (subcarpetas contenidas dentro de un Tree, y que pueden ser llenadas mediante las diferentes clases que tiene ROOT) del Tree.

3.1.5.2 Datos obtenidos directamente del osciloscopio

Los datos adquiridos directamente del osciloscopio, fueron analizados mediante la función *findpeak* de Matlab (Permite el análisis iterativo y los procesos de diseño con un lenguaje de programación que expresa las matemáticas de matrices y arrays directamente). En una fase previa únicamente se graficaron los datos de los voltajes registrados para conocer la forma de los pulsos lo cual se presenta en el anexo F. Al aplicar la función *findpeak* al vector de los voltajes registrados se puede identificar el voltaje de cada pulso y las anchuras de cada uno.

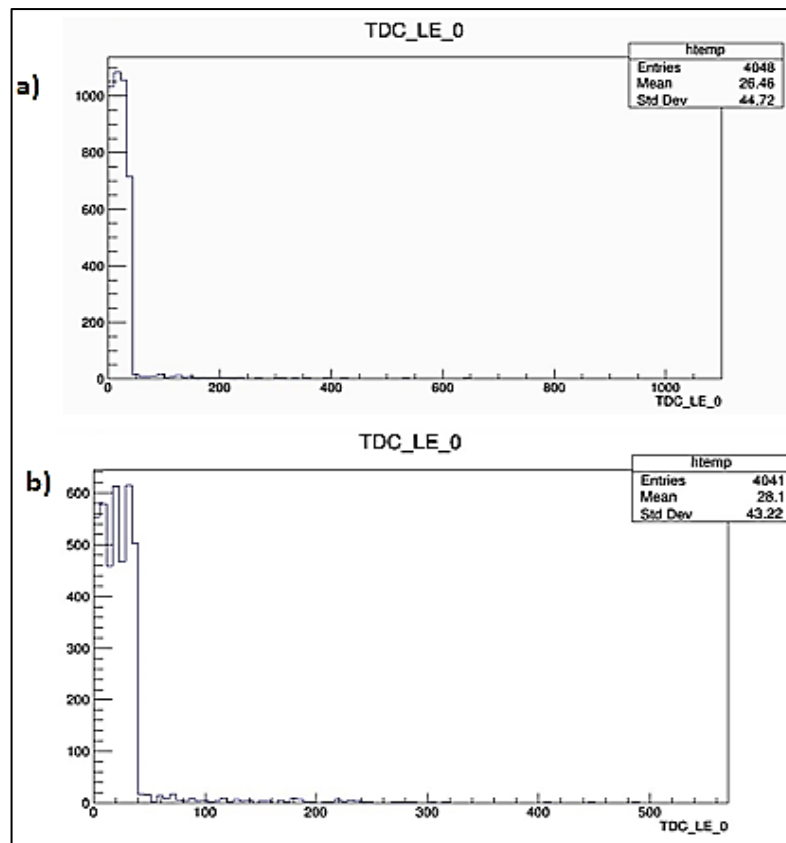
CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Resultados obtenidos para el prototipo con la DAQ

A continuación se muestran los datos procesados en la primera fase del diseño experimental bajo el procedimiento antes explicado, en los que se puede observar las distintas gráficas del TDC_LE y TE de los pulsos generados para la paleta con y sin fuente. Para la primera fase de la toma de datos se trabajó con una paleta de dimensiones 30x30x1cm. Se debe tener en consideración que para todas las pruebas realizadas las fuentes utilizadas siempre estuvieron en contacto con el centellador y el tiempo de toma de los datos fue de 1 hora, debido al tiempo de decaimiento de las mismas por lo cual se pueden considerar como emisores constantes.

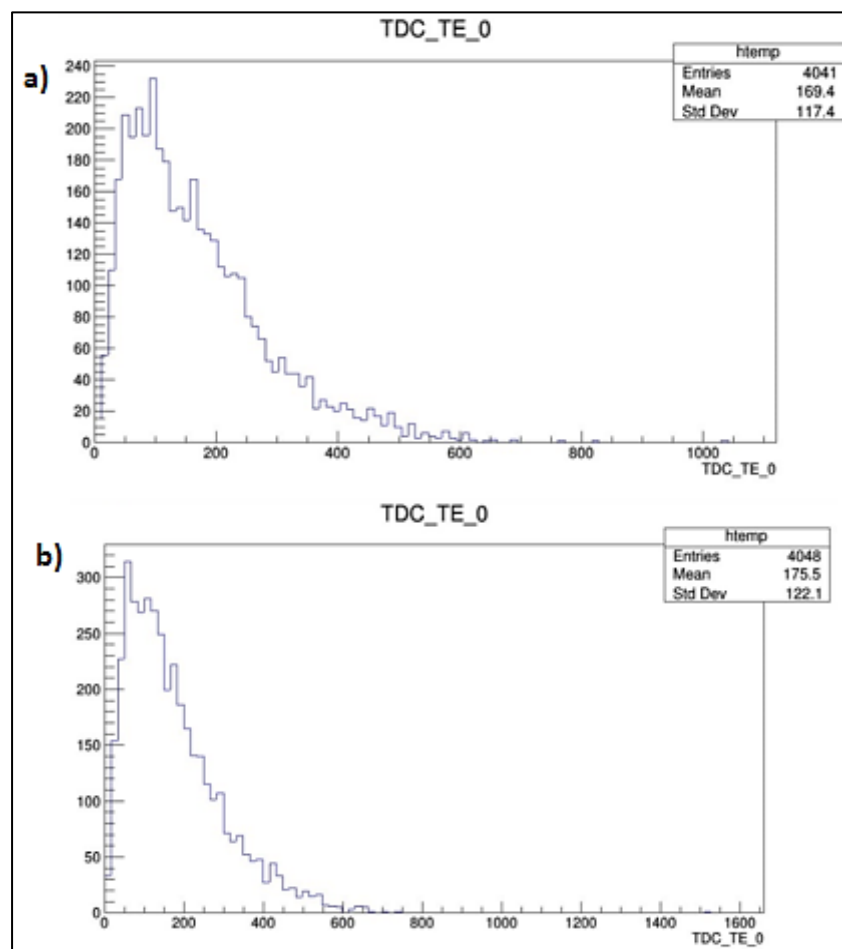
4.1.1 Paleta sin fuente Vs Paleta con fuente de ^{241}Am



Gráfica 1-4: a) TDC_LE para la paleta sin fuente (detección de muones), b) TDC_LE para la paleta con una fuente de ^{241}Am

Realizado por: Luis Guallichico, 2017

La figura 1-4 muestra el TDC LE calculado para la paleta sin la fuente y la paleta con una fuente de ^{241}Am , al observar el número de eventos registrados y el promedio de dichos tiempos; 26.46 y 28.1 respectivamente, ambos valores son bastante cercanos entre sí; por lo que se podría afirmar que en los dos casos el TDC generado para un pulso inducido por una partícula cargada (ya sea un muón o una partícula alfa) es el mismo, es decir se estarían midiendo eventos similares. Esto se puede afirmar debido a que las partículas alfa que inciden sobre el plástico centellador gastan toda su energía en interacciones con los átomos que conforman la propia estructura del centellador, razón por la cual dicha energía no es la suficiente para promover los electrones del *shifter* que lo componen y así provocar una emisión de fotones.



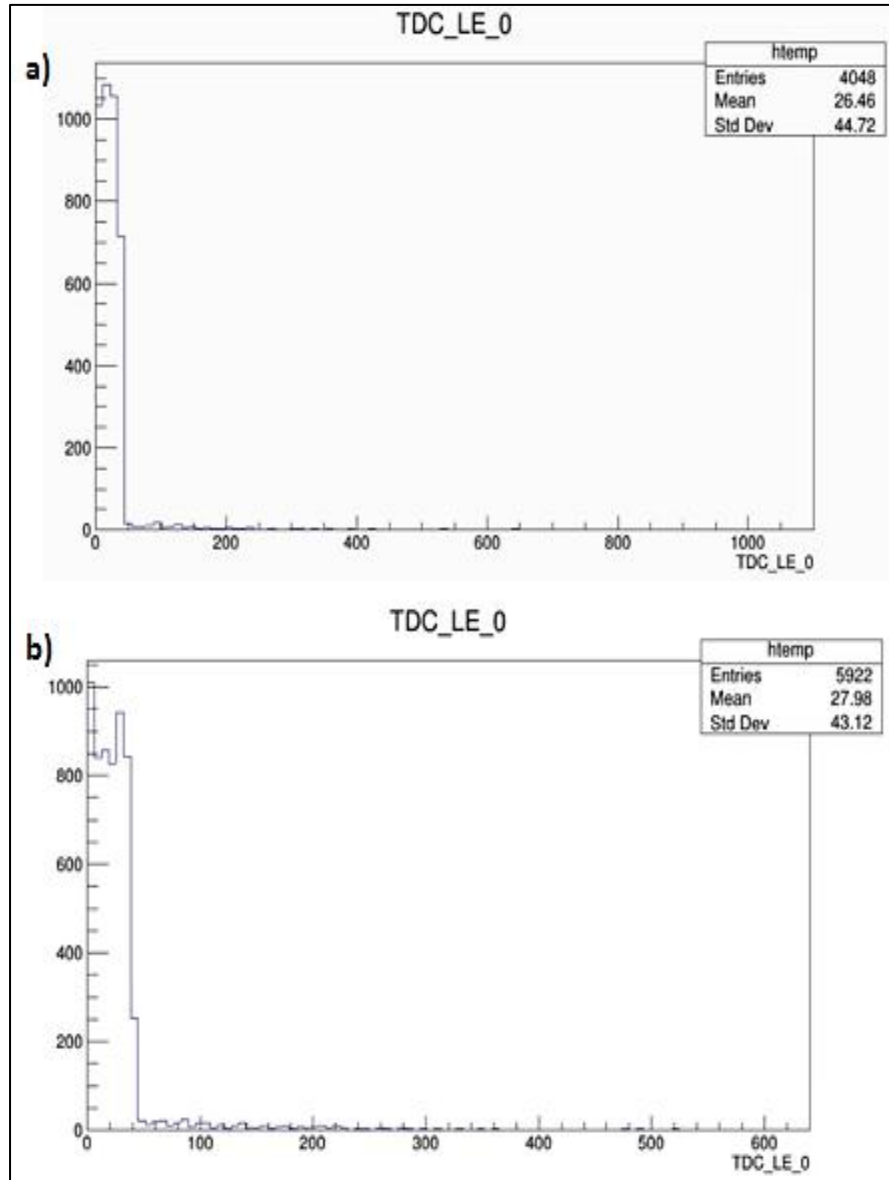
Gráfica 2-4: a) TDC_TE para la paleta sin fuente (detección de muones), b) TDC_TE para la paleta con una fuente de ^{241}Am

Realizado por: Luis Guallichico, 2017

El comportamiento observado para el TDC LE, de la figura 1-4 es similar en la figura 2-4, ya que el tiempo promedio para ambos casos son cercanos, por lo que en efecto se podría mencionar que para la presente prueba, los pulsos registrados corresponderían en gran medida a

la detección de muones, ya que en el caso de partículas cargadas de hasta 6 MeV estas son absorbidos en los primeros 470 μm de espesor del centellador plástico (Pelwan, et al., 2015, p. 145)

4.1.2 Paleta sin fuente Vs Paleta con fuente de ^{90}Sr

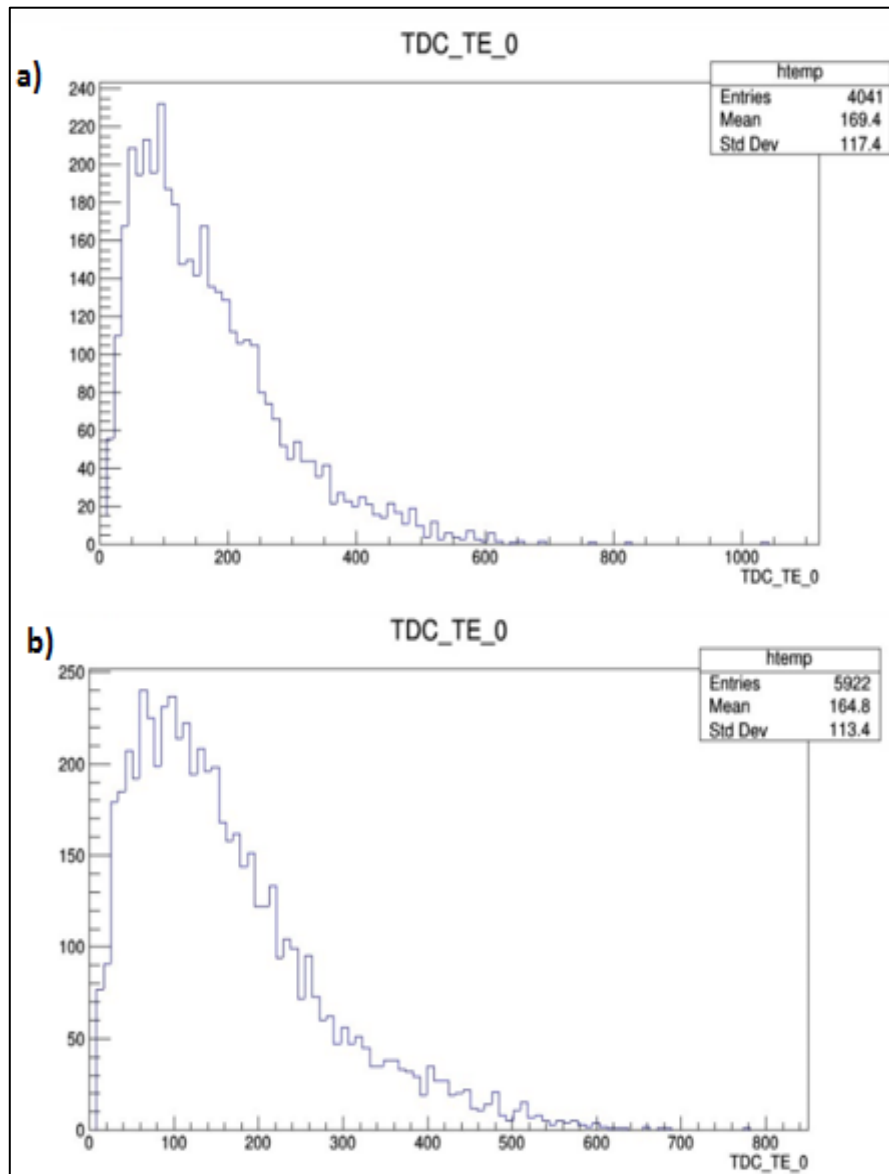


Gráfica 3-4: a) TDC_LE para la paleta sin fuente (detección de muones),
b) TDC_LE para la paleta con una fuente de ^{90}Sr

Realizado por: Luis Guallichico, 2017

Al observar la figura 3-4 a y b, el número de eventos es mayor para la paleta con la fuente, sin embargo el valor promedio del TDC registrado es aún más próximo. El registro de una mayor cantidad de eventos (pulsos), evidencia la existencia de otro tipo de partículas que esta interaccionando con el centellador; al ser la fuente de ^{90}Sr , un emisor beta y ya que dichas partículas tienen una mayor penetración y más alta energía (546 keV para el caso de ^{90}Sr), razón

por la cual inclusive partículas beta con energía de 18,6 keV pueden interactuar con espesores de hasta 2500 μm de centellador plástico produciendo luminiscencia (Kumar, 2011, p. 198).



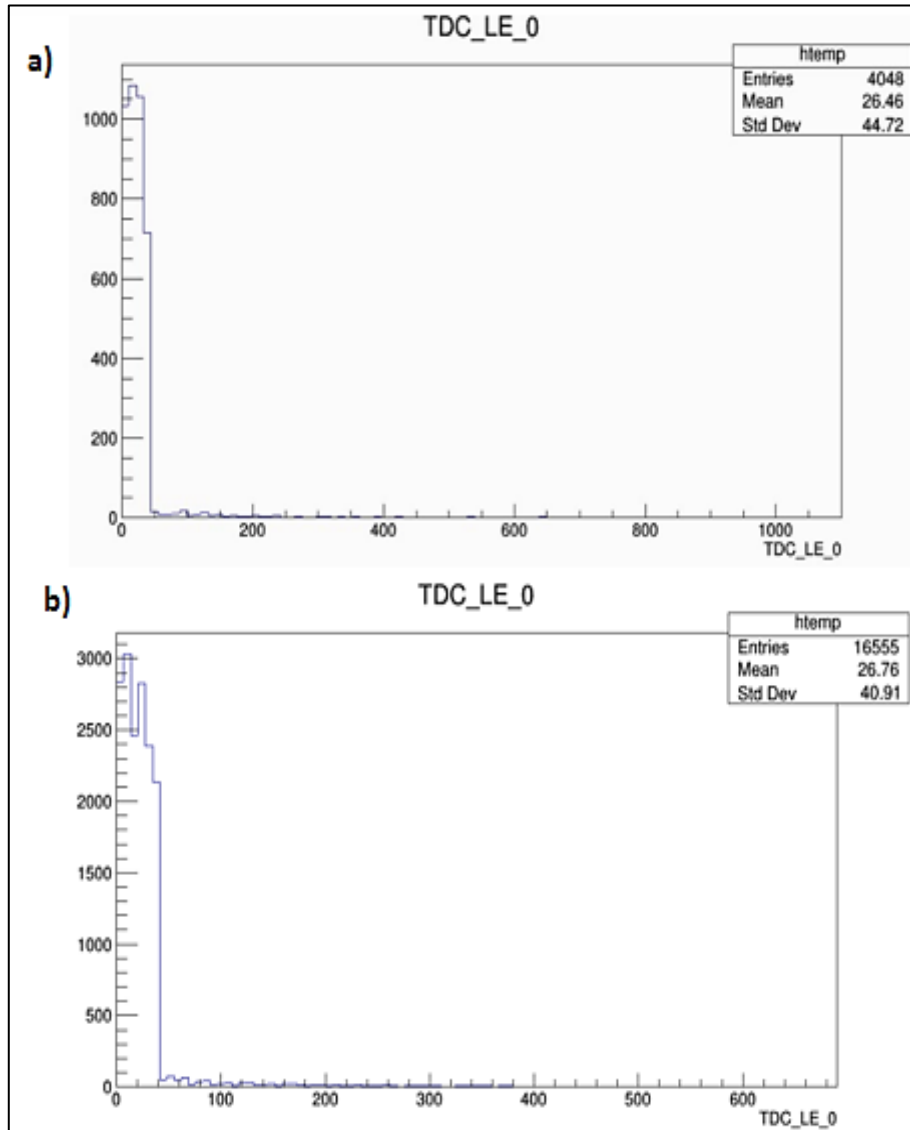
Gráfica 4-4: a) TDC_TE para la paleta sin fuente (detección de muones), b) TDC_TE para la paleta con una fuente de ^{90}Sr

Realizado por: Luis Guallichico, 2017

En la figura 4-4a se puede observar que al calcular el TDC TE para la paleta junto a la fuente, existen partículas que presentan tiempo de finalización del pulso, algo más prolongadas. Ya que el espesor del plástico es de 1 cm, las partículas beta únicamente depositarán parte de su energía en los primeros milímetros de espesor del centellador, por lo cual existirá un determinado número de pulsos que presenten una mayor duración como se puede observar en la figura 4-4b.

4.1.3 Paleta sin fuente Vs Paleta con fuente de ^{137}Cs

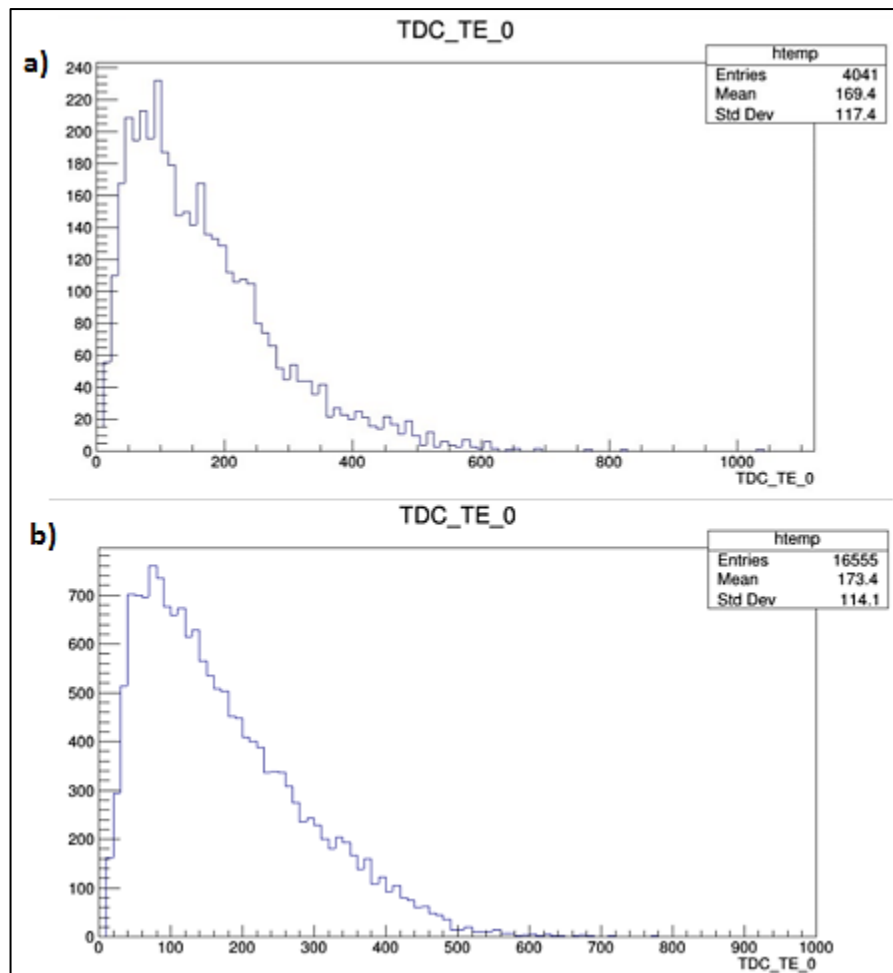
La gráfica 5-4a y b muestra el TDC para la paleta junto a una fuente de ^{137}Cs . El número de eventos registrados es claramente diferente de los registrados por la paleta sin la fuente.



Gráfica 5-4: a) TDC_LE para la paleta sin fuente (detección de muones), b) TDC_LE para la paleta con una fuente de ^{137}Cs

Realizado por: Luis Guallichico, 2017

Debido a que en esta prueba, el centellador se encuentra recibiendo partículas cargadas (muones y partículas beta) y fotones de alta energía (rayos gamma), debido a que la fuente en este caso el ^{137}Cs , emite fotones gamma de 662 keV y partículas beta con un pico de energía de 512 keV con una probabilidad de 0,946 (Kumar, 2011). Dicho proceso también se puede observar claramente en la gráfica 6-4a y b.



Gráfica 6-4: a) TDC_TE para la paleta sin fuente (detección de muones),
 b) TDC_TE para la paleta con una fuente de ^{137}Cs

Realizado por: Luis Guallichico, 2017

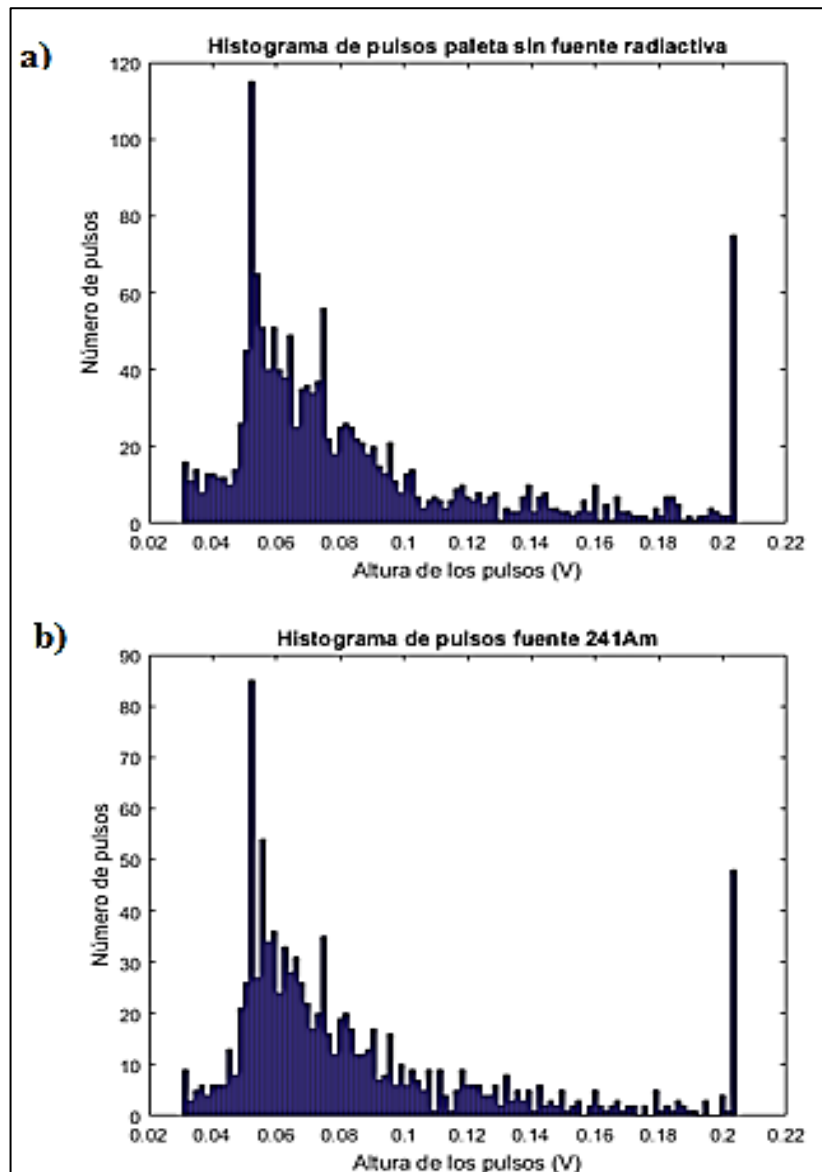
Para la segunda parte de las pruebas realizadas con el prototipo de detector, se trabajó mediante coincidencias dobles, con el arreglo experimental que se detalla en la metodología, para lo cual se determinó el voltaje de trabajo o polarización (V_{bias}) de los SiPM, mismo que se encontró en entre 27,5 y 27,75 mV.

4.2 Análisis de los pulsos detectados en función de la altura de los pulsos (Osciloscopio)

En virtud de que la fuente de ^{241}Am , no presentó un incremento significativo en el número de pulsos detectados, ya que la tasa de energía perdida se incrementa con la carga y la masa de la partícula detectada. El ^{241}Am emite partículas alfa de 5,5 MeV, siendo estas partículas de penetración débil, para iguales energías; una de dichas partículas solo producirá 1/10 de luz, ya que el promedio de pérdida de energía para interacción de una partícula cargada con un centellador plástico se establece entre 1.8 - 2 MeV/cm. Lo mencionado aquí también se

comprueba al analizar los TDC_LE y TDC_TE, tanto para la paleta sin la fuente y con la fuente mencionada y observar distribuciones similares como se muestra en la sección 4.1., por este motivo en la gráfica presentada a continuación se muestra únicamente los histogramas de pulsos sin hacer referencia a los ToTs obtenidos. Dichos datos fueron obtenidos directamente del osciloscopio y analizados mediante Matlab, con la función *findPeak*.

4.2.1 Fuente de emisión de partículas α (^{241}Am)

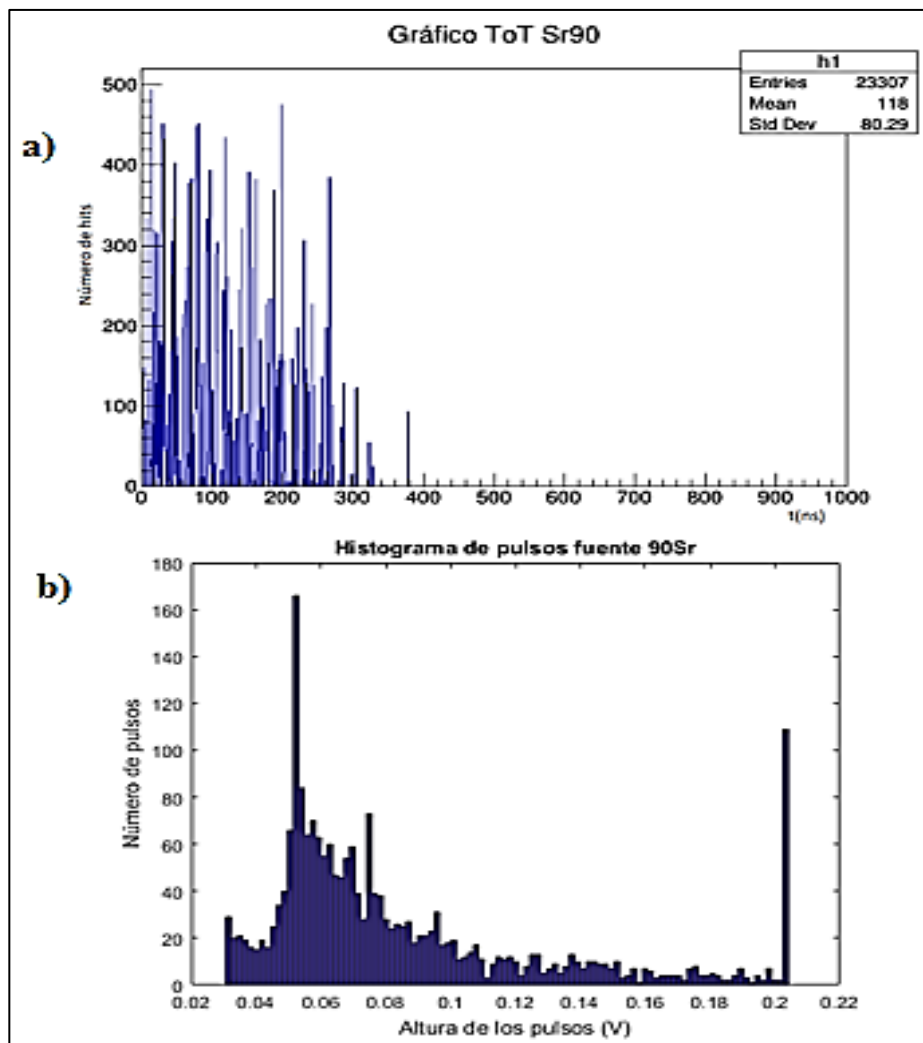


Gráfica 7-4: a) Histograma de pulso para la paleta sin fuente, b) Histograma de pulsos para la paleta en contacto con la fuente de ^{241}Am
Realizado por: Luis Guallichico, 2017

En la gráfica 7-4a y b el número de pulsos registrados es muy cercana, lo cual indica que en efecto, la señales generadas por la fuente, no puede ser detectada por la paleta de centellador

plástico, debido a su grosor. Para las dos gráficas se puede observar que la máxima altura de los pulsos se encuentra entre los 200 mV. En la región entre los 30 mV y los 100 mV, existe una gran concentración de pulsos que podrían deberse a la fuga de luz, es decir fotones que ingresan en el plástico en el momento de la toma de datos, afectado así a la señal registrada. Se debe mencionar además que los pulsos más energéticos (200mV) corresponden en su gran mayoría a la detección de muones.

4.2.2 Fuente de emisión de partículas β (^{90}Sr)



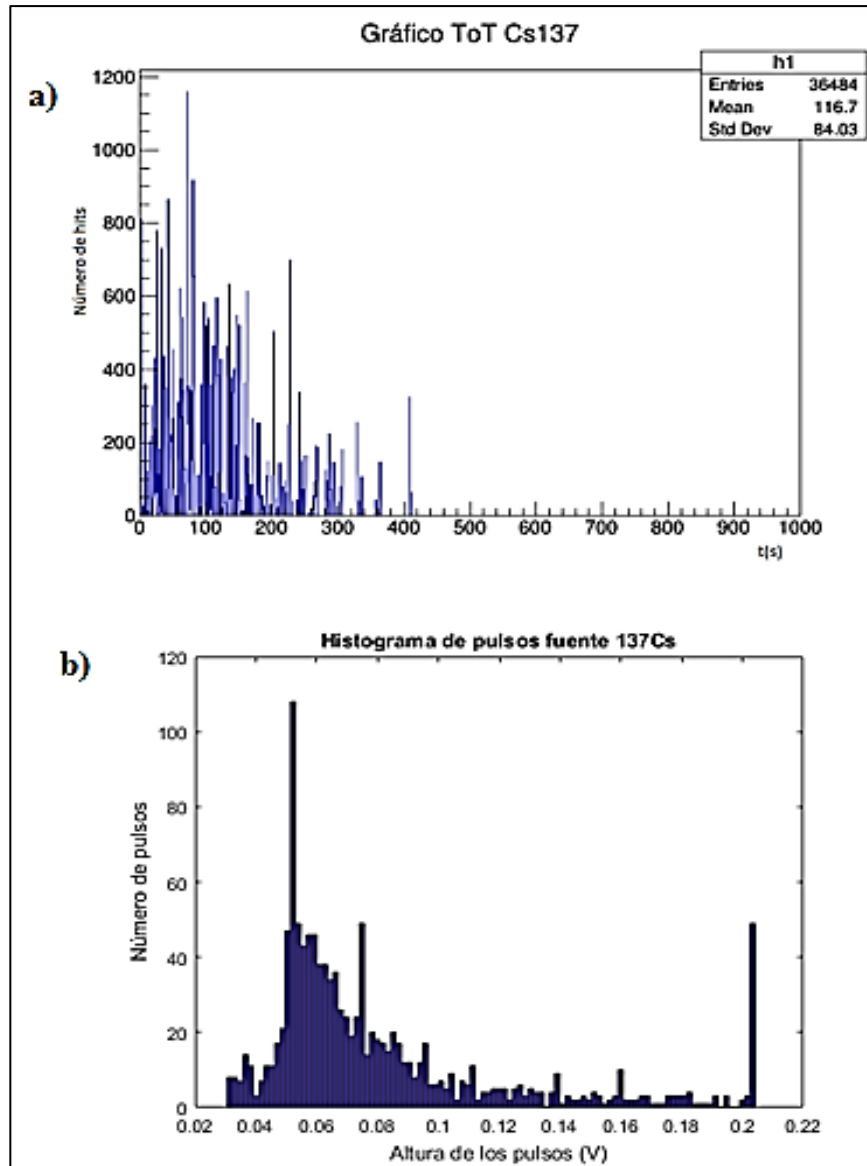
Gráfica 8-4: a) ToT para la paleta en contacto con la fuente de ^{90}Sr . b) Histograma de pulsos para la paleta en contacto con la fuente de ^{90}Sr

Realizado por: Luis Guallichico, 2017

Al analizar la gráfica 8-4a y b es evidente la detección, de una mayor cantidad de pulsos, con ToTs superiores a los 100 ns, lo cual corresponde al mayor poder de penetración de las partículas beta, sin embargo, existe también una mayor cantidad de ruido en cuanto a la cantidad

de pulsos detectados, ya que la tecnología de la DAQ, también permite el registro del decaimiento de los muones detectados. Al analizar el histograma de pulsos, se puede observar nuevamente que existe una gran cantidad de pulsos detectados en la región de 30 mV a 100 mV.

4.2.3 Fuente de emisión gamma (^{137}Cs)



Gráfica 9-4: a) ToT para la paleta en contacto con la fuente de ^{137}Cs . b) Histograma de pulsos para la paleta en contacto con la fuente de ^{137}Cs .

Realizado por: Luis Guallichico, 2017

En la figura 4-9 a) se muestra un histograma de los ToT hallados para el plástico centellador junto a la fuente de ^{137}Cs , en la cual se puede observar que los tiempos establecidos para partículas como muones se encuentran en el rango de los 100 ns, mientras que en la completa de tiempo de 1000ns se registran señales productos del decaimiento de dicha partícula detectada, sin embargo en la misma ventana se muestra cierta cantidad de señales detectadas en

el mismo tiempo y que se encuentran fuera del rango de los 100 ns establecidos, por lo cual se podría considerar que dichas señales adicionales provienen de la fuente radiactiva en cuestión.

Al observar y comparar dichos tiempos con la figura b, se podría establecer que una gran cantidad de muones detectados, tienen un ToT de 100 ns, con una amplitud promedio de 200 mV; existe sin embargo una cantidad pequeña de pulsos detectados con amplitudes que van desde los 100 mV, que podrían corresponder a partículas emitidas por la fuente y que se habrían presentado en los ToT superiores a los 100 ns y que alcanzarían a los 400 ns.

Se debe tener en consideración que tanto los histogramas ToTs, como los histogramas de pulsos, utilizan tecnologías diferentes, para la obtención de los ToT se utilizó la DAQ, la cual está diseñada, para la detección de tiempos de decaimientos de cada pulso generado por la detección de muones, dentro de una ventana de tiempo de 1000 ns, pudiendo también detectar en el mismo instante pulsos generados por otro tipo de partículas como alfas o betas, mientras que para los histogramas de pulsos, los datos utilizados provienen directamente desde el osciloscopio, que aunque tiene tiempos de adquisición menores (1GS/s) durante el registro en memoria el osciloscopio está bloqueado, lo que puede hacer que se pierdan pulsos, sin embargo puede permitir el conocimiento de la amplitud de una buena cantidad de pulsos generados por la detección de una partícula determinada.

4.3 Comprobación de la Hipótesis

En cuanto al cumplimiento y comprobación de la hipótesis, se debe mencionar que esta se la realizó mediante un análisis comparativo de los histogramas obtenidos, como se lo demuestra en el análisis de los resultados, tanto para el sistema que utiliza datos directamente del osciloscopio (histogramas de altura de los pulsos) como para el sistema basado en la QuarkNet (histogramas de TDC_LE, TDC_TE y ToT), estableciéndose que efectivamente el diseño y la construcción de un detector de radiación ambiental con el uso de centelladores plásticos es posible, pero aún se deben realizar pruebas más variadas, como la coincidencia y anti coincidencia de eventos detectados, lo que permitirá discriminar si un evento determinado corresponde a la interacción de un muón u otra partícula cargada o fotones con el centellador.

Se debe tener en consideración que aunque el sistema utilizado presenta un uso óptimo para la detección de rayos cósmicos, el motivo por el cual se hizo uso de este sistema para conocer si un prototipo de detector de radiación ambiental con centelladores plásticos puede ser construido, fue la alta capacidad de este tipo de materiales para absorber gas radón el cual es un emisor de partículas alfa.

Para que este fenómeno sea más evidente se requiere que el centellador tenga un grosor mucho menor que el utilizado en la presente investigación. La comparación de los histogramas permite identificar diferencias muy leves entre los datos para los arreglos experimentales con y sin fuente, sin embargo, al utilizar la QuarkNet (sistema que ofrece mayor precisión en el tiempo de detección de un evento), el incremento en el número de eventos detectados por los arreglos experimentales con las fuentes de ^{90}Sr y ^{137}Cs , hacen evidente la detección de otro tipo de partículas, a parte de los muones procedentes de los rayos cósmicos, razón por la que en posteriores trabajos se podría realizar arreglos experimentales en función del grosor de las paletas y diferentes configuraciones en la geometría del prototipo.

CONCLUSIONES

El objetivo principal del presente trabajo fue la construcción de un prototipo de detector de radiación ambiental, mismo que fue cumplido, mediante el acoplamiento de un centellador plástico, un SiPM y la DAQ; sin embargo durante la realización de las pruebas con dicho detector, los estudios demuestran que debido al grosor del centellador utilizado, partículas como las alfa no pueden ser detectadas debido a su bajo poder de penetración, es decir, un se quisiera detectar este tipo de partículas provenientes del decaimiento de gases nobles como lo es el radón, el cual se absorbe con facilidad en el centellador plástico, las mismas serán absorbidas por el centellador, lo cual no permitirá la generación del centelleo esperado. Por lo cual, si mediante el mismo arreglo experimental se espera detectar radiación ambiental proveniente del radón, se debería contar con un centellador plástico de menor espesor (entre 50 y 70 μm).

ROOT, se presentó en el presente trabajo de investigación y en investigaciones realizadas con centelladores como la herramienta más adecuada para el análisis de los datos provenientes del DAQ, debido a la gran cantidad de dichos datos adquiridos en sistema hexadecimal. A partir del procesamiento de esta información se pueden fácilmente obtener gráficos TDC_LE y TDC_TE, de los que se puede extraer información sobre la distribución de los pulsos en una ventana de tiempo determinada.

Aunque el prototipo de detector de radiación ambiental no es sensible a la detección de partículas alfa provenientes del decaimiento de radón, este es algo más sensible a la detección de partículas beta o radiación gama. Para dicha detección al trabajar con la DAQ, se utilizó un voltaje umbral de 30 mV, ya que la tasa de ruido fue establecida dentro de un rango menor a dicho voltaje. Mientras que el voltaje umbral de los SiPM se estableció en 27,6 V.

Cuando dentro del diseño del prototipo del detector se integró un osciloscopio (ADC) para extraer la información directamente de él, se debe tener en consideración que este, está limitado por restricciones analógicas y ya que el tiempo de adquisición es de 1GS/s, un tiempo extremadamente largo de medición representará una baja resolución, sin embargo mediante este tipo de sistema, se puede obtener la forma del pulso con un ancho correspondiente al tiempo de duración de este. Al graficar dicha información se pudo obtener información sobre el voltaje de cada pulso, pudiéndose observar que los pulsos de mayor amplitud tenían un voltaje de hasta 200 mV. Por otro lado al trabajar con la QuarkNet, cuyo funcionamiento se basa en la utilización de un bloque TDC acoplado a un FPGA, ofrece mayor precisión de la medición del tiempo en el que ocurre un evento, se reduce el área y la potencia de consumo de energía, y permite determinar el intervalo de tiempo entre dos impulsos de señal, es decir, el borde de

inicio y final de un pulso al cruzar un determinado umbral de voltaje, el cual para esta investigación fue de 30 mV. Hay que tener en claro que la presente tecnología se la utiliza de forma general en experimentos de física de altas energía como el tiempo de vuelo o mediciones de vida de una determinada partícula.

El prototipo de detector de radiación, es altamente sensible a la detección de partículas de alta energía tales como muones, los cuales presentaron amplitudes de hasta 200 mV, sin embargo, al realizar los histogramas de voltajes, se establecen zonas en las cuales existen una gran cantidad de pulsos con amplitudes de entre 40 y 100 mV, zona en la cual se estima se pueden encontrar gran cantidad de pulsos generados por las partículas detectadas (partículas beta de forma específica).

Los datos analizados en Matlab mediante la función *findpeak*, permitió observar la forma de los pulsos generados, así como también el voltaje de cada uno de estos y su duración mediante el cociente entre el ancho de cada pulso y el tiempo de adquisición del osciloscopio. Esta información se presentó mediante histogramas en función del voltaje y el número de pulsos. Se pudo verificar que la distribución de voltajes para el detector sin una fuente radiactiva y con la fuente de ^{241}Am , presentan similares distribuciones, como se lo esperaba; mientras que para la fuente de ^{90}Sr y ^{137}Cs , presentan ligeras diferencias, casi imperceptibles, lo cual nuevamente se debe en gran medida al grosor y las dimensiones del centellador utilizado, que en la presente investigación no pudo ser controlada.

RECOMENDACIONES

Para que el sistema de detección tenga un nivel de ruido e interferencia lo más bajo posible, este se lo debe aislar de la luz de forma adecuada, en general, es recomendable la construcción de una caja de aluminio que contenga todo el sistema de detección, lo cual hará que el nivel de saturación del SiPM sea bajo.

Para trabajos futuros en cuanto a un acople adecuado entre el centellador plástico y el SiPM, se podría utilizar fibra óptica que permita la conducción adecuada de la señal entre dichos elementos incrementando la eficiencia de detección del mismo; además se puede realizar pruebas colocando varios SiPM sobre la superficie del plástico centellador y realizar el análisis de datos obtenidos mediante coincidencias y anticoincidencias.

Es importante destacar que uno de los factores más cruciales durante la presente investigación fue el grosor y el tamaño del centellador, por lo cual se podría realizar pruebas mediante el diseño experimental aquí presentado, para diferentes tamaños y grosores del centellador.

BIBLIOGRAFÍA

AHMED, S. N. *Physics and Engineering of Radiation Detection*. 2º ed. Cap. 6. United States of America.: Elsevier. 2015, pp. 331-437

AMBROŽOVÁ, I., et al. *Cosmic radiation monitoring at low-Earth orbit by means of thermoluminescence and plastic nuclear track detectors*. Radiation Measurements. doi: 10.1016/j.radmeas.2016.12.004. 2017. p. 1

ASHISH, T., et al. *Radon as a Earthquake Precursor: A Review*. Vol. 4 Issue 6. International Journal of Science, Engineering and Technology. ISSN: 2395-4752. 2016. pp. 815-822

AXANI, S., et al. *The Desktop Muon Detector: A simple, physics-motivated machine- and electronics-shop project for university students*. Massachusetts, United States of America: Physics Department, Massachusetts Institute of Technology, 2016, pp. 1-60

BAGÁN, H., et al. *Alpha/beta pulse shape discrimination in plastic scintillation using comercial scintillation detectors*. Barcelona, España.: ELSEVIER. Analytica Chimica. doi:10.1016/j.aca.2010.04.055. Acta 670. 2010. pp. 11–17

CAMPBELL, L. & CRONE, B. *Efficient plastic scintillators utilizing phosphorescent dopants*. New Mexico, United State of America: Applied Physics Letters. Appl. Phys. Lett. 90, 012117. 2007. doi.org/10.1063/1.2430683

CONTACTO NUCLEAR. *Radiación Natural*. [En línea]. N° 61 (2009). pp. 16-20. [Consulta: 10 octubre 2017]. Disponible en:
<http://inin.gob.mx/plantillas/contactonuclear.cfm?ano=2011&consec=61&volumen=36>

DUMAZERT, J., et al. *Sensitive and transportable gadolinium-core plastic scintillator sphere for neutron detection and counting*. Gif-sur-Yvette, France: ELSEVIER. Vol.828. doi.org/10.1016/j.nima.2016.05.054. 2016. pp.181-190

ELY, J., et al. *Discrimination of Naturally Occurring Radioactive Material in Plastic Scintillator Material*. USA. 2004. pp. 1454-1457

GERMANIER, A. et al. *Mapa Dosimétrico de Radiaciones Ionizantes Ambientales*. Córdoba, Argentina. s.f. pp. 2-6. [Consulta: 10 de octubre 2016]. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/unc/paper35.pdf>

GILBOY, W.B., et al. *Industrial radiography with cosmic-ray muons: A progress report*. Londres, Inglaterra: ELSEVIER. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. Vol. 580. doi.org/10.1016/j.nima.2007.05.191. 2007. pp. 785-787

GONZÁLEZ, A. *Una mirada a la radiación natural*. [En línea]. Buenos Aires, Argentina.: Instituto de Energía y Desarrollo Sustentable Comisión Nacional de Energía Atómica. ISBN: 978-987-1323-12-8. 2011. pp. 41,42. [Consulta: 10 octubre 2017]. Disponible en: http://www.cab.cnea.gov.ar/ieds/images/extras/hojitas_conocimiento/ambiente/pag_41_y_42_radiacion_natural-gonzalez.pdf

INSTITUTO DE SALUD CARLOS III. *Determinación de niveles de radón*. [En Línea]. Madrid, España. [Consulta: 10 octubre 2017]. Disponible en: http://www.isciii.es/ISCIII/es/contenidos/fd-el-instituto/fd-organizacion/fd-estructura-directiva/fd-subdireccion-general-servicios-aplicados-formacion-investigacion/fd-centros-unidades/fd-centro-nacional-sanidad-ambiental/fd-servicios-cientifico-tecnicos_sanidad-ambiental/CIENTIFICO_TECNICOS_RADIOPROTECCION/DETERMINACION_RADON_RP.shtml

J.H. E. *Discrimination of Naturally Occurring Radioactive Material in Plastic Scintillator Material*. Northwest, United State of America: IEEE. 2003. pp. 1-5.

KAGAN, Y. *Are earthquakes predictable?*. Geophysical Journal International, Vol. 131, Issue 3, 1. doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb06595.x. 1997. pp. 505–525

KNOLL, G. *Radiation detection and measurement*, 3° Ed. Michigan, USA.: John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-471-07338-5. 1999. p. 219-247

KULESHOV, S. *Detector de gas radón*. [En línea]. Valparaíso, Chile.: INGENIUM. 2014. [Consulta: 10 octubre 2017]. Disponible en: <http://ingenium.usm.cl/noticias/detector-de-gas-radon/>

LEO, W.R. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. Heidelberg, Alemania.: Springer-Verlag. 1987. pp. 149-167

LÓPEZ MUÑOZ, B. & ITURBE GARCÍA, J. *Radiactividad natural y artificial en nuestro entorno*. [En línea]. México D.F.: CIENCIA: Revista de la academia mexicana de ciencias 2004. pp. 1-11. [Consulta: 10 octubre 2017]. Disponible en: http://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/55_2/radiactividad_nuclear.pdf

MILES, J. *Methodos of radon measurement and devices*. Oxfordshire, UK. National radiological Protection Board. pp. 1-8

MITEV, K. *Measurement of ^{222}Rn by absorption in plastic scintillators and alpha/beta pulse shape discrimination*. Sofia, Bulgaria.: Applied Radiation and Isotopes. Vol. 110. 2016. pp. 236–243

MONOSALVAS, J. *Radiación ambiental en la zona central del Perú*. Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG. Vol. 9, N° 18, pp. 78-81 (2006). ISSN: 1561-0888

MORA RODRÍGUEZ, P. & MORA RAMÍREZ, E. *Monitoreo ambiental con detectores termoluminiscentes en Costa Rica*. 2006. 24(1). pp. 21-30. ISSN: 0378-0524

MUKHOPADHYAYA, S. *Plastic gamma sensors: an application in detection of radioisotopes*. [En línea]. Bechtel Nevada, United State of America . 2015. pp. 1-12. [Consulta: 16 de octubre 2016]. Disponible en: <https://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/811396/>

NAKAOKA, T., et al. *Study of a detector system for high-energy astrophysical objects using a combination of plastic scintillator and MPPC*. Hiroshima, Japon: ELSEVIER. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. Vol. 831. doi.org/10.1016/j.nima.2016.03.063. 2016. pp. 400-403

NANDA, A., et al. *A simple technique for gamma ray and cosmic ray spectroscopy using plastic scintillator*. [En línea]. Kerala, India. 2015. pp. 1-3. [Consulta: 16 de octubre 2016]. Disponible en: <https://arxiv.org/pdf/1407.7181.pdf>

PARAJULI, P. *Study of Radon Exhalation Rate in Soil Samples of Kathmandu Valley Using Passive Detector LR115.* Nepal, India.: International Journal of Chemical and Physical Sciences. Vol. 4. No 4. ISSN: 2319-6602. 2015. pp. 30-39

PÉREZ GONZÁLEZ, Heberto. *Caracterización de Plásticos Centelladores Acoplados a Fibras Ópticas de Corrimiento de Longitud de Onda.* (tesis) (pregrado). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México. 2010. pp. 29-82.

PICHEL, A. et al. *Caracterización de un detector de muones.* Buenos Aires, Argentina: ANALES ALFA Vol. 18. 2006. pp. 243-246

PIEDECAUSA GARCIA, B., et al. *Radiactividad natural de los materiales de construcción. Aplicación al hormigón. Parte I. Radiación externa: índice de riesgo radiactivo.* Alicante, España.: Revista Técnica CEMENTO HORMIGÓN N°945. ISSN: 0008-8919. 2011. pp. 40-65

PIÑONES, O. *Una mirada a la radiación natural.* [En línea]. Santiago de Chile.: DEPRA, SEVRA, CCHEN. 2016. pp. 1-3. [Consulta: 10 octubre 2017]. Disponible en: http://oirs.cchen.cl/saber/PDF/radiacion_natural.pdf

POURTANGESTANI, Khadijeh Kathy. *Optimization of Plastic Scintillator Thicknesses for Online Beta Detection in Mixed Fields.* [En línea] (tesis) (maestría). University of Ontario Institute of Technology, Ontario, Canada. 2010. pp. 2,3. [Consulta: 11 octubre 2017]. Disponible en: https://ir.library.dc-uoit.ca/bitstream/10155/138/4/Pourtangestani_Khadijeh.pdf

PRESSYANOV, D. *Measuring Radioactive Noble Gases by Absorption in Polycarbonates and Other Organics: From Radon Indoors to Nuclear Safety.* Sofia, Bulgaria.: AIP Conf. Proc. 1544. doi: 10.1063/1.4813470. 2013. pp. 130-137

RUNDO ACURIO, Erick Sebastián. *Detección y estudio de rayos cósmicos en la zona ecuatorial a diferentes alturas utilizando detectores de centelleo plástico.* (tesis) (pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. 2013. pp. 82-83.

RYLANDER, J., et al. *QuarkNet Cosmic Ray Muon Detector User's Manual Series "6000" DAQ.* USA: 2010, pp. 1-64

SCAN. *Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares (SCAN): Radiactividad.* [En línea]. Quito, Ecuador. [Consulta: 15 septiembre 2016]. Disponible en: <http://www.energia.gob.ec/subsecretaria-de-control-y-aplicaciones-nucleares/>

SHAHBAZI-GAHROUEI, D., et al. *A review on natural background radiation.* Adv Biomed. 2: 65. doi: 10.4103/2277-9175.115821. 2013. pp. 1-7

TSOULFANIDIS, N. *Measurement and detection of radiation.* 2° Ed. Cap. 6. United States of America.: Taylor & Francis. ISBN 1-56032-317-5. 1995. pp. 221-250

UNSCEAR. *Sources and effects of ionizing radiation. Anexo A.* [En línea]. New York, United State of America: Naciones Unidas. 1993. pp. 34-42. [Consulta: 16 de octubre 2016]. Disponible en: http://www.unscear.org/docs/publications/1993/UNSCEAR_1993_Report.pdf

UNSCEAR. *Sources and effects of ionizing radiation.* [En línea]. New York, United State of America: Naciones Unidas. 2008. pp. 6-15. ISBN-13:978-92-1-142280-2. [Consulta: 16 de octubre 2017]. Disponible en: http://www.unscear.org/docs/publications/2008/UNSCEAR_2008_GA-Report-CORR.pdf

UNSCEAR. *Summary of low-dose radiation effects on health.* [En línea]. Viena, Austria: Naciones Unidas. ISBN 978-92-1-642010-9 e-ISBN 978-92-1-054915-8. 2010. pp. 6-13. [Consulta: 11 de octubre 2016]. Disponible en: http://www.unscear.org/docs/publications/2010/UNSCEAR_2010_Report.pdf

VAN LOEF, E. et al. *Gamma-ray spectroscopy and pulse shape discrimination with a plastic scintillator.* Watertown, USA: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. Vol. 288. 2015

VAN LOEF, E. et al. *Plastic Scintillators With Neutron/Gamma Pulse shape discrimination.* IEEE, TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE. 2014

VARGAS PIEDRA, Stephany Elizabeth. *Implementación y calibración de un detector terrestre cherenkov de agua para rayos cósmicos en la Escuela Politécnica Nacional* (tesis).(pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. 2016. pp. 92-93.

WHO. *WHO handbook on indoor radon. a public health perspective.* [En línea]. Paris, Francia. ISBN 978 92 4 154767 3. 2009. pp. 3-30. [Consulta: 16 septiembre 2017]. Disponible en: http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44149/1/9789241547673_eng.pdf

WOITH, H. *Radon earthquake precursor: A short review.* Potsdam, Germany: Springer. The European Physical Journal. Special Topics. DOI: 10.1140/epjst/e2015-02395-9. 2015. pp. 611-627

YAMAMOTO S & HATAZAWA J. *Development of an alpha/beta/gamma detector for radiation monitoring.* Cobe, Japón.: 82 (11): 113503. doi: 10.1063/1.3658821. 2011

YAMAMOTO, S. & AIDA, T. *A position-sensitive alpha detector using a thin plastic scintillator combined with a position-sensitive photomultiplier tube.* Nagoya, Japón.: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A .N° 418. 1998. pp.387-393

ANEXOS

Anexo A: Propiedades de varios centelladores plásticos comerciales

| PROPERTIES | EJ-200 | EJ-204 | EJ-208 | EJ-212 |
|---|---|--------|--------|--------|
| Light Output (% Anthracene) | 64 | 68 | 60 | 65 |
| Scintillation Efficiency (photons/1 MeV e ⁻) | 10,000 | 10,400 | 9,200 | 10,000 |
| Wavelength of Maximum Emission (nm) | 425 | 408 | 435 | 423 |
| Light Attenuation Length (cm) | 380 | 160 | 400 | 250 |
| Rise Time (ns) | 0.9 | 0.7 | 1.0 | 0.9 |
| Decay Time (ns) | 2.1 | 1.8 | 3.3 | 2.4 |
| Pulse Width, FWHM (ns) | 2.5 | 2.2 | 4.2 | 2.7 |
| H Atoms per cm³ (×10 ²²) | 5.17 | 5.15 | 5.17 | 5.17 |
| C Atoms per cm³ (×10 ²²) | 4.69 | 4.68 | 4.69 | 4.69 |
| Electrons per cm³ (×10 ²³) | 3.33 | 3.33 | 3.33 | 3.33 |
| Density (g/cm ³) | 1.023 | 1.023 | 1.023 | 1.023 |
| Polymer Base | Polyvinyltoluene | | | |
| Refractive Index | 1.58 | | | |
| Softening Point | 75°C | | | |
| Vapor Pressure | Vacuum-compatible | | | |
| Coefficient of Linear Expansion | 7.8 × 10 ⁻⁵ below 67°C | | | |
| Temperature Range | -20°C to 60°C | | | |
| Light Output (L.O.) vs. Temperature | At 60°C, L.O. = 95% of that at 20°C No change from -60°C to 20°C | | | |

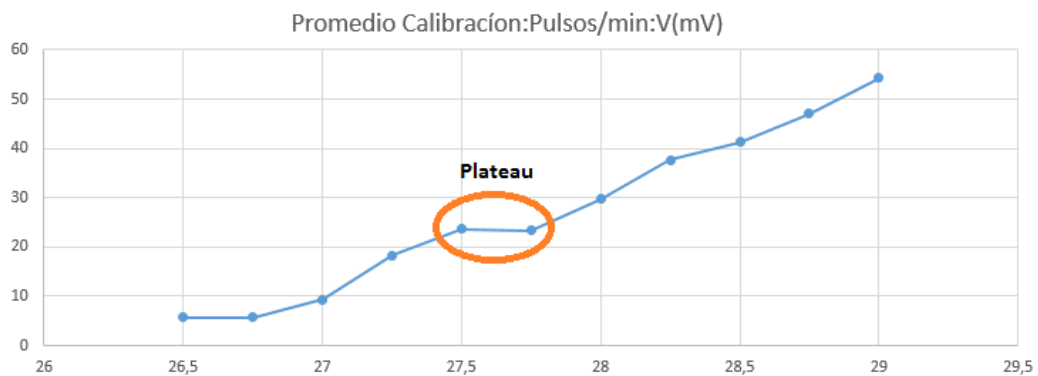
Figura 1A: Propiedades del centellador plástico EJ-200

Fuente: (Carrasco & Díaz Kelmy, 2017)

Anexo B: Calibración del detector – Voltaje de trabajo del SiPM

Para la obtención del voltaje de trabajo o polarización óptima (*bias voltage*), del SiPM, se calibró el detector para cada una de las paletas utilizadas, mediante el siguiente procedimiento:

1. Una vez montado el sistema de adquisición de datos, el voltaje umbral se lo colocó en 30 mV desde la terminal del emulador de la QuarkNet.
2. El voltaje suministrado al SiPM desde la tarjeta electrónica de polarización, se lo incremento desde 26 mV en pasos de 0.25 mV hasta llegar a un máximo de 29 mV.
3. Para cada paso de voltaje, se anotaron el número de cuentas por minuto.
4. Se realizó una gráfica del número de cuentas en función del voltaje de polarización suministrado (Gráfica B-1), para encontrar la mejor meseta (*Plateau*). La meseta de calibración consiste en afinar los voltajes de operación adquiridos anteriormente, de tal manera que con estos voltajes se obtenga el mismo número de pulsos eléctricos en todos los fotomultiplicadores.
5. El proceso anterior se repitió por tres ocasiones para poder obtener un promedio. El voltaje de trabajo hallado se estableció entre 27,5 y 27,75 mV



Realizado por: Luis Guallichico, 2017

Gráfica 1B: Obtención de la meseta de calibración para el prototipo de detector

Anexo C: Significado de las columnas del output de la QuarkNet DAQ

Se presenta la descripción del significado de las 16 columnas que contiene cada evento registrado por la DAQ.

| Columna | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N |
|---------|----------|-------|----|----|----|----|----|----|----|----------|------------|--------|---|----|
| | C62E9981 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 34 | 00 | 00 | C5700B1D | 181756.467 | 290917 | V | 08 |
| Columna | O | P | | | | | | | | | | | | |
| | 0 | +0020 | | | | | | | | | | | | |
| | C6530C96 | 00 | 00 | 00 | 00 | 31 | 00 | 00 | 00 | C5700B1D | 181756.467 | 290917 | V | 08 |
| | 0 | +0020 | | | | | | | | | | | | |
| | C6530C97 | 00 | 00 | 00 | 00 | 3A | 00 | 00 | 00 | C5700B1D | 181756.467 | 290917 | V | 08 |
| | 0 | +0020 | | | | | | | | | | | | |
| | C6530C9C | 00 | 00 | 00 | 3D | 00 | 00 | 00 | 00 | C5700B1D | 181756.467 | 290917 | V | 08 |
| | 0 | +0020 | | | | | | | | | | | | |

Realizado por: Luis Guallichico, 2017

Descripción de cada columna (Rylander, et al., 2010):

A: es el número de pulso en el cual la señal se empieza a generar. Los datos se encuentran en sistema hexadecimal, por lo cual deben ser convertidos a decimal para poder usarlos.

B: Tiempo en el que el borde frontal del pulso es detectado para el canal 0 (LE_0)

C: Tiempo en el que el borde posterior del pulso es detectado para el canal 0 (LE_0)

Figura 1C: Output de la QuarkNet DAQ – Archivo .dat

D: Tiempo en el que el borde frontal del pulso es detectado para el canal 1 (LE_1)

E: Tiempo en el que el borde posterior del pulso es detectado para el canal 1 (LE_1)

F: Tiempo en el que el borde frontal del pulso es detectado para el canal 2 (LE_2)

G: Tiempo en el que el borde posterior del pulso es detectado para el canal 2 (LE_2)

H: Tiempo en el que el borde frontal del pulso es detectado para el canal 3 (LE_3)

I: Tiempo en el que el borde posterior del pulso es detectado para el canal 3 (LE_3)

J: representa en número de pulso en el que la señal deja de ser detectada.

K: Representa el tiempo (GTM)

L: Fecha del registro de los eventos

M: Permite conocer si la señal del GPS es válida o no, la letra A, representa que la señal es válida.

N: Número de satélites

O: El error en función del número de bits

P: El tiempo de retraso entre cada evento detectado

Anexo D: Adquisición de datos con la QuarkNet

Fase I

Se debe establecer el nivel umbral mediante:

TL 4 030: Coloca el *threshold* para los 4 canales en 30 mV

Una vez colocado el *threshold*, se debe activar únicamente el canal cero (CH0), que es el cual tomará los datos. Posteriormente se debe verificar que dicho valor umbral de voltaje fue registrado, para esto se debe colocar los siguientes comandos:

WC 00 01: activa solo el canal cero

VI: Permite verificar los parámetros ingresados

Una vez verificado los parámetros mencionados; mediante los comandos **Ctrl A** y luego **Z**, aparecerá el menú del minicom¹, que al digitar la letra **L**, permitirá grabar un nuevo set de datos, al cual deberemos colocar un nombre, seguido de su extensión, en este caso **.dat**. Para iniciar con la recolección de datos se debe presionar el comando **CE** para habilitar el conteo y el sistema empezará a registrar cada uno de los eventos, durante el tiempo que se considere necesario hasta obtener un archivo de datos con la robustez necesaria.

Los datos registrados fueron tomados por el lapso de una hora; transcurrido este tiempo presionamos **CD** para deshabilitar el contador y automáticamente el sistema dejará de registrar los eventos y finalmente presionamos nuevamente el comando Ctrl A y luego Z, y en el menú presionamos la letra **Q** para salir, y el sistema habrá guardado de forma inmediata el archivo generado. El proceso descrito lo realizamos para cada uno de los arreglos experimentales realizados con cada una de las fuentes radiactivas.

Fase II

Para la segunda fase de recolección de datos, los pasos a seguir son similares, con la única diferencia que ahora en la terminal del minicom, debemos escribir los siguientes comandos:

WC 00 0F: abre todos los canales y recoge datos sin coincidencias

WC 00 1F: abre todos los canales y recoge datos con una coincidencia

WC 00 2F: abre todos los canales y recoge datos con dos coincidencias

¹ Programa de modem basada en texto y emulación de terminal para sistemas operativos Unix

Una vez registrados los comandos mencionados para cada arreglo experimental y al teclear el comando **CE**, el sistema empezará el registro y almacenamiento de los eventos en archivos como los mencionados, mismos que se extrajeron, para su posterior análisis mediante scripts basados en lenguaje de programación en C++ y ROOT.

Anexo E: Análisis de datos mediante ROOT.

Para realizar el análisis de los datos obtenidos mediante la QuarkNet se debe seguir los siguientes pasos:

1. El “desempaquetador (Script que permite el procesamiento de archivos proveniente de una QuarkNet, puede ser descargado en: <https://github.com/ECFM-USAC/Escaramujo>)” contiene un archivo **qNet2root6000.cc** que hay que compilarlo con **make** en la terminal de Linux/Ubuntu, y corre sobre el output de la QuarkNet en este caso el archivo **.dat**.
2. Una vez compilado el archivo mencionado, En la línea de comandos se lo debe correr así:

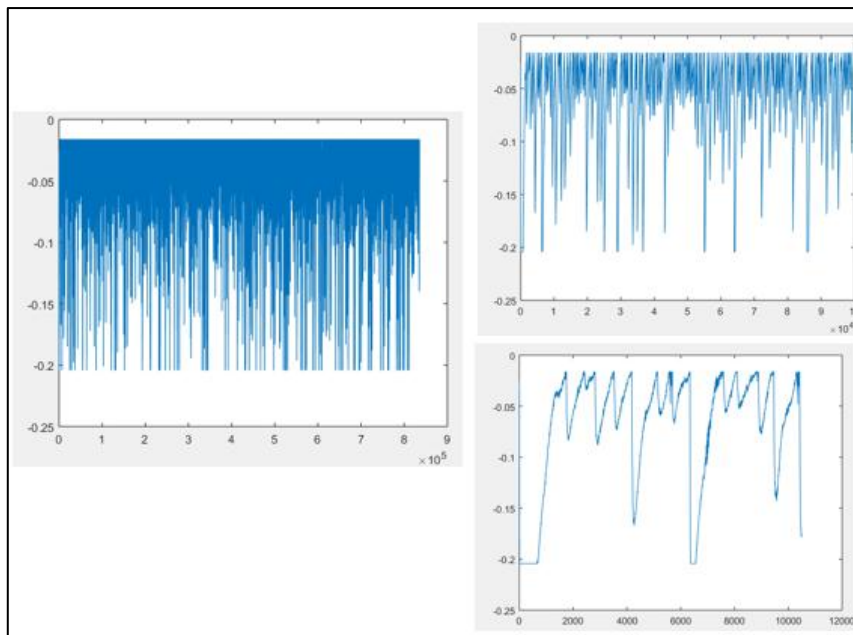
```
./qNet2root6000.exe Nombre_del_archivo_de_entrada.dat Nombre_del_archivo_de_entrada.root
```

El archivo **.dat** es el output de la QuarkNet, que se convierte en el archivo de entrada para el script que compilamos. El nombre del archivo **.root**, es solo un nombre que se le puede dar al output o archivo de salida. Una vez realizado el proceso anterior, se debe correr ROOT y escribir en la línea de comandos: **new TBrowser()**, para abrir un Tree (ROOT se encuentra constituido por varios objetos, clases y métodos. Un Tree es un objeto dentro del cual se encuentran las clases TTree y TNtuple, para el manejo de objetos o arrays de datos de gran tamaño.), como se muestra en la figura. Se deberá entonces, seleccionar la carpeta en la cual los archivos antes mencionados fueron guardados. Finalmente en dicha carpeta se encontrarán los histogramas generados para cada canal de adquisición de datos en función de los TDC_LE y TDC_TE.

Anexo F: Forma de los pulsos para el centellador plástico en contacto con fuentes radiactivas

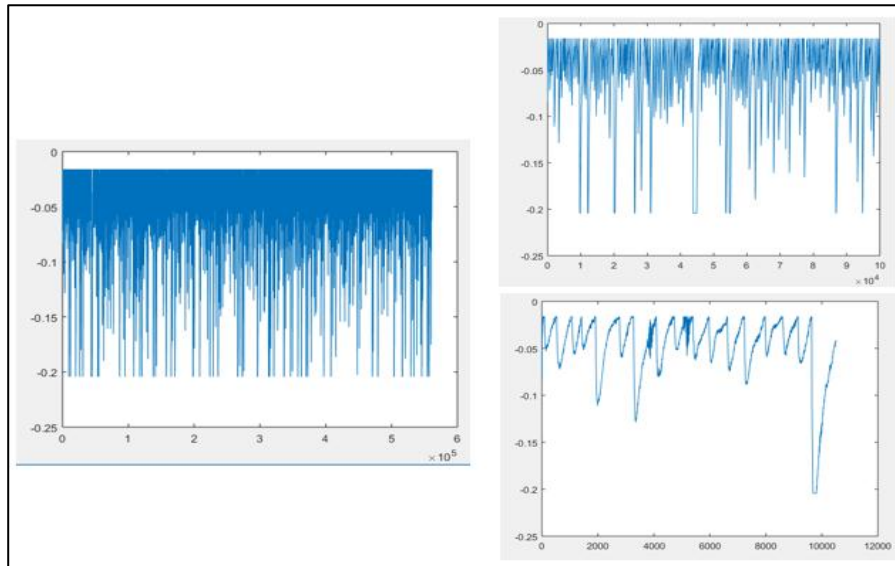
Los pulsos mostrados a continuación, corresponde al registro de eventos para el centellador plástico en contacto con fuentes radiactivas, para lo cual se utilizó un osciloscopio, junto a un script desarrollado en *Labview* (Talavera & Cazar, 2017), el cual genera un archivo de datos con extensión .txt, mismo que contiene información sobre la amplitud de los pulsos registrados. Estos datos fueron importados en Matlab y graficados.

El tiempo de duración del ancho de los pulsos es de alrededor de 500 ns. El archivo generado fue procesado mediante Matlab. Para cada rango de datos el tratamiento fue: a) grafica del archivo completo; b) los 100000 primeros datos y finalmente c) los 10000 primeros datos (para evidenciar diferencias entre las formas de los pulsos).



Gráfica 1F: Forma de los pulsos para el detector (centellador plástico) sin contacto con fuentes radiactivas (detección de muones)

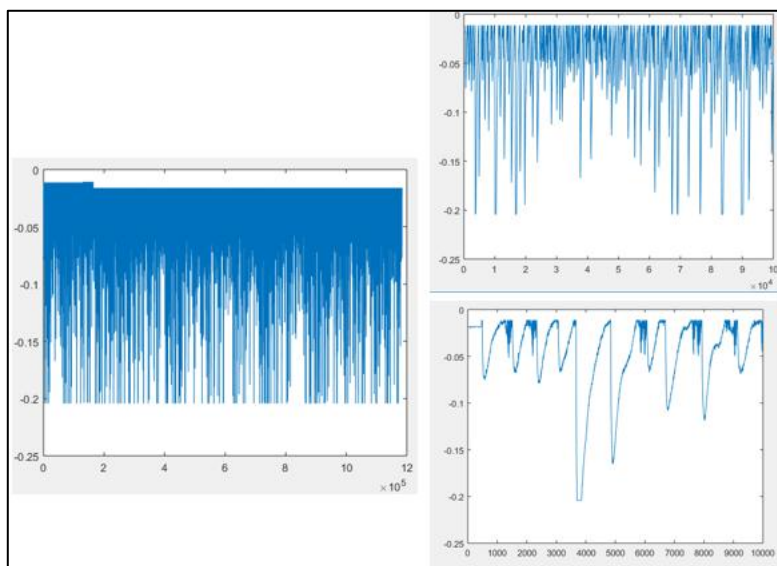
Realizado por: Luis Guallichico, 2017



Gráfica 2F: Forma de los pulsos para el detector (centellador plástico) en contacto con una fuente de ^{241}Am

Realizado por: Luis Guallichico, 2017

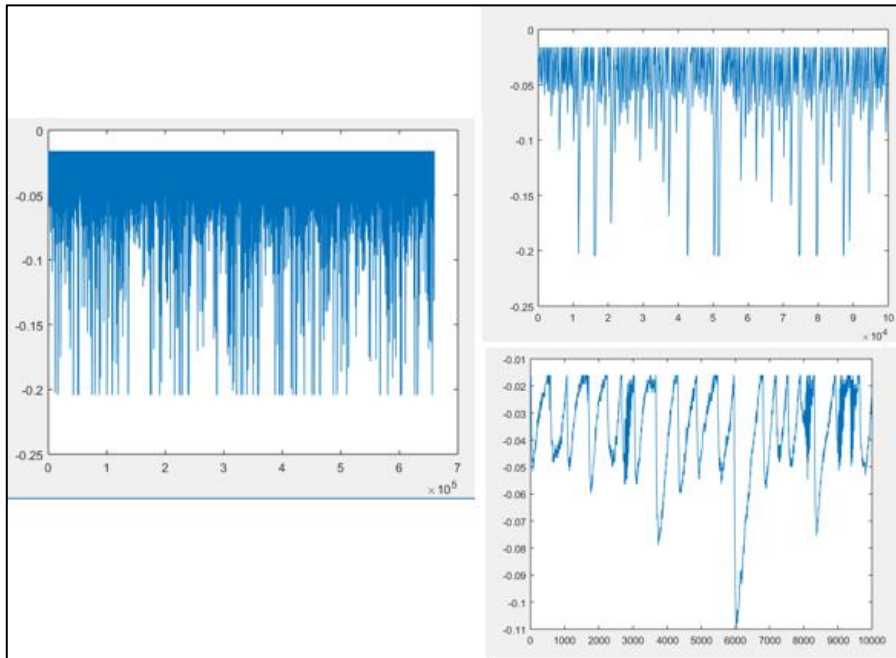
Las gráficas 13-4 y 12-4 presentan grandes similitudes en las formas de sus pulsos, lo cual en efecto se esperaría, ya que el grosor del centellador plástico es de 1 cm, razón por la cual las partículas alfa emitidas por el ^{241}Am , no tienen el suficiente poder de penetración para interactuar con el mismo haciendo que pierdan toda su energía en los primeros micrómetros, por lo cual la excitación de los electrones del cromóforo no se produce.



Gráfica 3F: Forma de los pulsos para el detector (centellador plástico) en contacto con una fuente de ^{90}Sr

Realizado por: Luis Guallichico, 2017

En la gráfica 14-3, se pueden observar pulsos que en su decaimiento presenta una pequeña curvatura, lo cual se produciría por decaimientos posteriores de los muones que interaccionan en el interior del plástico centellador. La gráfica 15-3, corresponde a los pulsos detectados cuando el detector fue puesto en contacto con una fuente de ^{137}Cs , el cual es un emisor beta y gama, razón por la que nos e puede apreciar diferencias entre los pulsos detectados, por lo cual se podría confundir la señal entre los pulsos generados por la fuente radiactiva y el ruido propio de la electrónica utilizada.



Gráfica 4F: Forma de los pulsos para el detector (centellador plástico) en contacto con una fuente de ^{137}Cs

Realizado por: Luis Guallichico, 2017