



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

**“ESTUDIOS PRELIMINARES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN
PROTOTIPO DE DETECTOR DE RADIACIÓN BASADOS EN
CENTELLADORES PLÁSTICOS”**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:

BIOFÍSICO

AUTORAS: DÍAZ VALDIVIEZO KELMY ARACELLY
CARRASCO MONTESDEOCA CATERINE YESENIA

TUTOR: Dr. Richard Pachacama.

Riobamba-Ecuador

2017

© 2017, Díaz Valdiviezo Kelmy Aracelly y Carrasco Montesdeoca Caterine Yesenia

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: ESTUDIOS PRELIMINARES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE DETECTOR DE RADIACIÓN BASADOS EN CENTELLADORES PLÁSTICOS, de responsabilidad de las señoritas, Díaz Valdiviezo Kelmy Aracelly y Carrasco Montesdeoca Caterine Yesenia, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, quedando autorizada su presentación.

FIRMA

FECHA

Dr. Richard Pachacama

DIRECTOR DE TESIS

PhD. Dennis Cazar.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

“Nosotras **KELMY ARACELLY DÍAZ VALDIVIEZO Y CATERINE YESENIA CARRASCO MONTESDEOCA**, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autoras asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.

Riobamba, 2 de Junio del 2017

.....

KELMY ARACELLY

DÍAZ VALDIVIEZO

.....

CATERINE YESENIA

CARRASCO MONTESDEOCA

DEDICATORIA

A Dios, por concederme la oportunidad de poder cumplir una meta más en mi vida.

A mis Padres Gustavo y Mariana por su ejemplo de perseverancia, su comprensión y apoyo constante, por sus sabios consejos, para ser una persona responsable y triunfadora en cada momento de mi existencia.

A mis queridas hermanas: Mariza Lisett, Dayanara Estefanía y Marazca Anahí, quienes con su inocencia y amor fueron los motivadores diarios para cumplir la meta trazada, que más tarde será el modelo a seguir para ser personas útiles a la sociedad.

A las personas que han hecho todo en la vida para que pueda lograr mis sueños.

Kelmy Díaz

A Dios, por ser parte de mi vida y acompañarme en cada instante, dándome la oportunidad de cumplir una meta importante de mi vida.

A mis Padres Raúl y Marlene por ser el pilar de mi vida, y siempre inculcarme valores y deseos de superación. Ser mi ejemplo, brindarme su comprensión y consejos. Estar conmigo apoyándome en cada momento.

A mis hermanos: Raúl Bernardo y Cristian, quienes con su ejemplo de hermanos mayores me han sabido guiar y ser mis compañeros.

Caterine Carrasco

AGRADECIMIENTO

Queremos agradecer a todas aquellas personas que de una u otra forma han hecho posible concluir el presente trabajo de titulación. De manera especial a:

Dr. Richard Pachacama, Director de Tesis, por su orientación y apoyo incondicional, lo que hizo posible la elaboración y culminación del presente trabajo de titulación. Gracias por la guía y la confianza

PhD. Dennis Cazar por la oportunidad de contribuir y ser parte de LEOPARD. Gracias por los conocimientos impartidos y por el apoyo brindado para poder culminar esta investigación.

José Mora Bioquímico de la Universidad San Francisco de Quito quien con su ayuda inmediata nos colaboró con la elaboración de los prototipos, siendo de gran ayuda y apoyo dentro de los conocimientos químicos.

A la Universidad San Francisco de Quito por el préstamo de sus equipos y laboratorios utilizados en el desarrollo del trabajo de titulación.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y en especial a los laboratorios de la facultad de Ciencias que nos dieron apertura para poder realizar los diferentes análisis.

CONTENIDO

	Páginas
RESUMEN	xiv
ABSTRACT.....	xv
INTRODUCCIÓN	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
JUSTIFICACIÓN	4
OBJETIVOS	5
CAPITULO I	
1. MARCO TEORICO.....	6
1.1 Partículas de alta energía.....	6
<i>1.1.1 Rayos Cósmicos.....</i>	<i>7</i>
<i>1.1.2. Muones.....</i>	<i>7</i>
<i>1.1.2.1 Interacción de muones con la materia.....</i>	<i>8</i>
<i>1.1.3 Partículas que detecta un centellador.....</i>	<i>9</i>
1.2 Centelladores.....	11
<i>1.2.1 Mecanismo de centelleo.....</i>	<i>12</i>
<i>1.2.2 Centelladores orgánicos.....</i>	<i>13</i>
<i>1.2.3 Condiciones de un buen detector de centelleo.....</i>	<i>14</i>
1.3 Centelladores Plásticos.....	14
<i>1.3.1 Mecanismo físico de funcionamiento.....</i>	<i>15</i>
<i>1.3.2 Aplicaciones.....</i>	<i>17</i>
1.4 Métodos físicos y químicos para la caracterización de centelladores plásticos.....	18
<i>1.4.2 Análisis Termogravimétrico (TGA).....</i>	<i>20</i>
<i>1.4.3 Análisis TermomecánicoTMA.....</i>	<i>21</i>
<i>1.4.4 Espectrometría de luz Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR).....</i>	<i>22</i>
CAPITULO II	
2. MÉTODOS Y TÉCNICAS	24
2.2 Periodo y lugar donde se realizó la investigación.....	24
2.3 Materiales.....	24
2.4 Procedimientos.....	25
<i>2.4.2 Elaboración del prototipo.....</i>	<i>26</i>

2.4.3 Pulido de las muestras	30
2.4.4 Prueba de Funcionamiento	30
2.4.5 Equipos	32

CAPITULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	33
3.1 Pruebas de caracterización Físicas y Químicas	33
<i>3.1.1 Valor de la densidad</i>	33
<i>3.1.2 Calorimetría Diferencial de Barrido DSC</i>	33
<i>3.1.3 Análisis Termogravimétrico TGA</i>	35
<i>3.1.4 Análisis Termomecánico(TMA)</i>	39
<i>3.1.5 Espectrometría Infrarroja por transformada de fourier (FTIR)</i>	41
3.2 Diseño experimental del prototipo	49

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

GLOSARIO

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

INDICE DE TABLAS

Tabla 1-2. Aspectos Físicos de los centelladores de referencia	25
Tabla 2-2. Cantidad de los componentes a utilizar para la elaboración del centellador prototipo.	29
Tabla 1- 3. Tabla de densidades para muestras de centelladores plásticos	33
Tabla 2- 3. Rangos de descomposición de los plásticos centellantes de referencia	38
Tabla 3- 3. Resultados de los prototipos de plásticos centellantes, aspectos físicos.	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Espectro energético de rayos cósmicos.	6
Figura 2-1. Diagrama esquemático de la ducha de rayos cósmicos	8
Figura 3-1. El muón decae a menudo en un neutrino de muón, antineutrino de electrones y un electrón.	9
Figura 4-1. Generación de los dos pulsos de luz	12
Figura 5-1. Niveles energéticos en una molécula de centellador orgánico.	13
Figura 6-1. Centelladores plásticos de diferentes geometrías	15
Figura 7-1. Mecanismo de detección.....	15
Figura 8-1. Ilustración de dos detectores puestos para captar solamente radiación cósmica, impidiendo captar radiación terrestre. Dos detectores es más probable que se trate de un evento cósmico que terrestre.....	16
Figura 9-1. Experimento realizado en Fermilab al acoplar 4 centelladores conectados.....	16
Figura 10-1. Diagrama de funcionamiento físico de centelladores	17
Figura 11-1. Montaje frecuentemente utilizado para montar un centellador de gran	18
Figura 12-1. Simulación de la Calorimetría Diferencial de Barrido DSC	19
Figura 13-1. Ejemplo de un termograma de una sustancia o polímero.	19
Figura 14-1. Termografía típica de un polímero.....	20
Figura 15-1. Termogramas TGA de las muestras de polímero realizadas	21
Figura 16-1. Diagrama de Espectro FTIR en función de la	22
Figura 1-2. Medida de Densidad de las tres muestras de referencia.	25
Figura 2-2. Realización de las muestras 1, muestra 2 y muestra 3.....	27
Figura 3-2. Realización de las muestras 4 y muestra 5. Utilización de una probeta de 50ml para medir la cantidad de estireno.....	28
Figura 4-2. Proceso de homogenización utilizando la varilla y removiéndolos durante 4 minutos.	28
Figura 5-2. Proceso de baño maría, para la muestra 5.	29
Figura 6-2. Técnica del pulido de las muestras en sus caras opuestas utilizando el equipo pulidor marca Dual Speed Grinder Polisher que contiene un paño, sobre él se coloca albúmina disuelta en agua. El proceso de pulido dura de dos a 4 horas por muestra.	30
Figura 7- 2. Colocación del SiPMs en una de las muestras-prototipo.....	31
Figura 8- 2. Puesta en marcha del prototipo	32
Figura 9- 2. Señal en el osciloscopio de los dos centelladores.	32

Figura 1- 3. Prototipos de centelladores plásticos obtenidos,50

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1- 2. Esquema de funcionamiento de los prototipos.....	31
Gráfico 1- 3. Termograma DSC para la muestra 1 de referencia.....	34
Gráfico 2- 3. Termograma DSC para la muestra 2 de referencia.....	34
Gráfico 3- 3. Termograma DSC para la muestra 3 de referencia.....	35
Gráfico 4- 3. Termograma TGA para la muestra 1.....	36
Gráfico 5- 3. Termograma TGA para la muestra 2.....	37
Gráfico 6- 3. Termograma TGA para la muestra 3.....	38
Gráfico 7- 3. Termograma TMA de la muestra 1 de referencia.....	39
Gráfico 8- 3. Termograma TMA de la muestra 2 de referencia.....	40
Gráfico 9- 3. Termograma TMA de la muestra 3 de referencia.....	41
Gráfico 10- 3. Prueba de FTIR para la muestra 1 de referencia.....	41
Gráfico 11- 3. Prueba de FTIR para la muestra 2 de referencia.....	42
Gráfico 12- 3. Prueba de FTIR para la muestra 3 de referencia.....	43
Gráfico 13- 3. Espectro FTIR para el prototipo 1.....	44
Gráfico 14- 3. Espectro FTIR para el prototipo 2.....	44
Gráfico 15- 3. Espectro FTIR para el prototipo 3.....	45
Gráfico 16- 3. Espectro FT-IR del prototipo 5.....	46
Gráfico 17- 3. Análisis de FTIR para el prototipo 5.....	46
Gráfico 18- 3. Espectro FTIR del estireno.....	47
Gráfico 19- 3. Espectro FTIR para el material que actúa como secante Mek.....	48
Gráfico 20- 3. Espectro FTIR de la resina epoxi.....	48
Gráfico 21- 3. Espectro FTIR del Octoato de Cobalto.....	49
Gráfico 22- 3. Resultado del funcionamiento de las muestras-prototipos.....	51

INDICE DE ANEXOS

ANEXO A. Propiedades de los centelladores comerciales EJ-200, EJ-204, EJ-208, EJ-212

ANEXO B. Obtención de datos utilizando tres centelladores plásticos para la detección de partículas cósmicas.

ANEXO C. Sistema de detección de muones.

ANEXO D. Tablas para la interpretación básica de espectros en la región infrarroja.

RESUMEN

El objetivo fue determinar las condiciones y elementos necesarios para el desarrollo de centelladores plásticos para la detección de partículas de alta energía. Mediante la utilización de materiales de bajo costo: estireno, resina, metiletil cetona (Mek) y octoato de cobalto, se hicieron 5 prototipos con cantidades diferentes de cada material. Al aplicarla técnica de la Transformada de Fourier-Infrarrojo (FTIR) se pudo caracterizar todas las muestras para comparar la composición química de los prototipos con respecto a los 3 centelladores de referencia comerciales. La comprobación del funcionamiento se realizó utilizando una muestra de control, el SiPMs (Fotomultiplicador de Silicio), conectada tanto a la muestra de control como a la muestra-prototipo, las dos muestras conectadas al osciloscopio mediante el sistema electrónico para la detección de partículas de alta energía, la señal obtenida en el osciloscopio fue la que determinó si los prototipos tenían alguna propiedad de detectores o no. Todos los prototipos no dieron respuesta de una señal en comparación a la muestra de control, por lo que los valores fueron totalmente desfavorables. Esta investigación permite concluir para posteriores estudios, que las técnicas utilizadas de fabricación de prototipos son las adecuadas, sin embargo, es necesario ocupar materiales que actúen como fluorescentes (PPO) y desplazadores de longitud de onda (POPOP), para conseguir resultados mayores a los obtenidos logrando fabricar centelladores plásticos propios en el país, que puedan competir con centelladores plásticos comerciales.

Palabras Clave:<CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES>, <FÍSICA>, <ASTROFÍSICA>
<CENTELLADORES PLÁSTICOS>, <PARTÍCULAS DE ALTA ENERGÍA>, <TRANSFORMADA DE FOURIER-INFRAERROJO (FTIR)>, <FOTOMULTIPLICADOR DE SILICIO (SiPMs)>, <MATERIALES FLUORESCENTES>, <2,5 DIFENILOXAZOL(PPO)>, <1,4-BIS-BENCENO (POPOP)>

ABSTRACT

The objective was to determine the conditions and elements necessary for the development of plastic scintillators for the detection of high-energy particles. By using low cost material: styrene, resin, methyl ethyl ketone (Mek) and cobalt octoate, five prototypes were made with different amounts of each material. When the technique of the Fourier Transform (FTIR) was applied, it was possible to characterize all the samples to compare the chemical composition of the prototypes with respect to the three commercial reference scintillators. The performance check was executed using a control sample, the SiPMs (Silicon Photomultiplier), connected to both the control sample and the prototype sample, the two samples connected to the oscilloscope by means of the electronic system for the detection of particles high energy. The signal obtained in the oscilloscope was the one that determined if the prototypes had some property of detectors or not. All the prototypes did not give response of a signal in comparison to the control sample, the reason why the values were totally unfavorable. This research allows concluding for later studies that the techniques used to manufacture prototypes are adequate; however, it is necessary to occupy materials that act as fluorescents (PPO) and wavelength shifters (POPOP), in order to achieve greater results than those achieved to manufacture own plastic scintillators in the country, which can compete with commercial plastic scintillators.

Key words: <EXACT AND NATURAL SCIENCES>, <PHYSICS>, <ASTROPHYSICS>, <PLASTIC SCINTILLATORS>, <HIGH ENERGY PARTICLES>, <INFRARED FOURIER TRANSFORM>, <SILICON PHOTOMULTIPLIER>, <FLUORESCENT MATERIALS>, <2,5-DIPHENYLOXAZOLE (PPO)>, <1,4-BIS-BENZENE (POPOP)>

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo de titulación se han realizado ESTUDIOS PRELIMINARES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE DETECTOR DE RADIACIÓN BASADOS EN CENTELLADORES PLÁSTICOS. Como bien se sabe la detección de la radiación es de gran importancia dentro del campo de la medicina, la seguridad industrial, ambiental y de la física de altas energías. Los centelladores plásticos son equipos encargados de convertir la radiación en luz visible que posteriormente son transformados en impulsos eléctricos para su respectivo procesamiento y análisis.

Desarrollar en nuestro país centelladores plásticos basados en productos y técnicas existentes en el país beneficiaría y aceleraría el desarrollo de prototipos de detectores de radiación, ya sea esta procedente de rayos cósmicos como también de radiación natural. Teniendo como finalidad determinar las condiciones y elementos necesarios que pueden ser conseguidos a un bajo costo en el Ecuador pero que presenten características similares a las que poseen los centelladores comerciales.

El capítulo I se encuentra la fundamentación teórica, referente a los plásticos centelladores, describiendo al muón, origen y componente muónica, interacción de los muones con la materia. Luego se habla sobre los centelladores plásticos y su mecanismo físico de funcionamiento, las aplicaciones del mismo, el sistema de detección de muones, en el cual ha sido necesario detallar características primordiales sobre el fotomultiplicador, la tarjeta de adquisición de datos y la fuente de energía. Para terminar, se describe los métodos físicos y químicos para la caracterización de centelladores plásticos.

En el Capítulo II se presenta los métodos y técnicas utilizadas para desarrollar cada una de las pruebas requeridas para realizar el prototipo de centellador plástico, en donde se detallan el periodo y lugar donde se realizó la investigación. Los materiales utilizados para la elaboración de los prototipos. Los procedimientos en donde se contó con tres tipos de centelladores de diferentes aspectos para ser utilizados como centelladores de referencia.

En el Capítulo III se presentan los Resultados y Discusión de los mismos, como primeros resultados se muestra las pruebas de caracterización físicas de los centelladores, las densidades obtenidas para cada una de las muestras tienen un porcentaje de error menor que el de la bibliografía consultada. También se muestran las pruebas de caracterización químicas: Calorimetría Diferencial de Barrido DSC, Análisis Termogravimétrico TGA, Espectrometría Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) y Análisis Termomecánico TMA.

En el capítulo IV se establecen las conclusiones y finalmente se tienen las recomendaciones obtenidas a lo largo del trabajo de investigación.

ANTECEDENTES

Con el descubrimiento de un nuevo tipo de radiación proveniente del espacio en el siglo XX. Crookes en 1903 fue el primero en utilizar un cristal de centellador para la detección de partículas llamado SPINTHAISCOPIO que consistía en una placa de sulfuro de Zinc (ZnS) en donde se producían pequeños destellos luminosos al ser golpeada por partículas alfa, el conteo de las partículas que golpeaban el detector se hacía utilizando el ojo humano. Curran y Baker en 1944 mejoraron el instrumento de Crookes reemplazando el ojo humano por un tubo fotomultiplicador que hace más eficiente el conteo de los destellos producidos, esto dio como resultado el nacimiento del primer detector de partículas con centellador plástico.

El interés por detectar partículas cósmicas dio lugar a la fabricación de detectores de dos tipos orgánicos e inorgánicos, los primeros tuvieron una mejor acogida por sus características de versatilidad, eficiencia y entrega de mejores resultados a la hora de toma de datos; sin embargo los componentes para su fabricación tienen precios elevados y son difíciles de conseguir en pequeñas cantidades (como las necesarias para construcción de prototipos), de aquí surge la idea de explorar otros materiales con los que puedan realizar plásticos centelladores con la misma eficiencia, transmitancia y rendimiento de luz que un centellador plástico polimerizado.

Transcurrido el año 1957 en el Departamento de Ciencia Nuclear y Departamento de Física del estado de Massachusetts, G.W. Clark, F. Scherb y W.B. Smith, hacen una revisión bibliográfica sobre la preparación de centelladores plásticos con un coste igual al valor de los materiales utilizados para fabricar centelladores líquidos y que mostrara una mejor eficiencia. Encontraron algunas ventajas en elaborar centelladores sólidos en comparación a los líquidos, como: el disolvente (tolueno) dejaba de ser volátil, inflamable y tóxico, se reducían las fugas y derrames difíciles de prevenir. Por lo tanto, los centelladores plásticos eran más fácilmente aplicables.

En el estado de Florida, en el año 1988, Carl Zorn, Margaret Browen, Stan Majewski, James Walker and Randolph Wojcik, del Departamento de Física, realizaron un estudio piloto de nuevos centelladores plásticos resistentes a radiaciones que estaban dopados con 3-Hidroxiflavina, para lo cual un conjunto de polímeros de plástico que usaban polivinil o poliestireno como materia prima fueron dopados con p-terfenilo o 3-hidroxiflavina, estos plásticos mostraron una resistencia significativa a la propagación de radiación inducida de una fuente gamma.

En el año 2000, en el Fermi National Accelerator Laboratory de Estados Unidos, Anna Pladmau, Alan D. Bross, Kerry L. Mellott realizaron un estudio para construir detectores de centelleo plástico de bajo costo para lo cual utilizaron gránulos de poliestireno que comercialmente eran fácil de conseguir y con técnicas que añaden dopantes se llevó a cabo la fabricación de barras de centelladores plásticos los resultados obtenidos de transmitancia y rendimiento de luz fueron los mismos que un centellador plástico polimerizado (monómero), indicando que la técnica utilizada es viable para construir a gran escala.

Alumnos de la UNAM y 50 investigadores de México realizaron las primeras contribuciones al proyecto Auger durante el periodo 2009 - 2012, que constó de un detector denominado BATATA, que contenía 3 planos de centelladores que fueron enterrados a diferentes profundidades. Estos centelladores plásticos fueron hechos de poliestireno co-extrudado con una capa reflectora de dióxido de Titanio, siendo del mismo tipo que las utilizadas por el detector de neutrinos MINOS, el objetivo de la fabricación de este tipo de centelladores se centró principalmente en la detección de muones provenientes de los chubascos atmosféricos de rayos cósmicos a medida que penetren en el suelo.

Erick Sebastián Rundo Acurio de la EPN en el año 2013 presentó un proyecto en el cual se realizó la detección y estudio de rayos cósmicos en la zona ecuatorial a diferentes alturas utilizando detectores de centelleo plásticos, así como la vida media del muón y el cálculo de diferentes coincidencias que definen a un evento dentro de una lluvia de rayos cósmicos, el resultado de medir experimentalmente con el detector fue de $2.189 \pm 0.04 \mu\text{s}$ que es similar al valor teórico, $2.19695 \pm 0.00006 \mu\text{s}$. Los plásticos centelladores utilizados no fueron contruidos en el país sino importados.

En el año 2016 en el Departamento de Ingeniería Nuclear de la Universidad de Hanyang, Cheol Ho Lee, Jaebum Son, Tae-Hoon Kim, and Yong Kyun Kim, fabricaron tres centelladores plásticos de diferente diámetro y longitud para compararlos con centelladores plásticos comerciales que usaban la polimerización del monómero de estireno 2,5 difeniloxazol(PPO) y 1,4-bis-benceno (POPOP), cada una de sus longitudes de onda de emisión máxima se determinaron a 426,06nm, 426,06nm y 425,00nm, estos centelladores representaron 99,7% de linealidad energética y una salida de luz del 59% a 64% en comparación con el centellador de referencia.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A través de la historia el uso de detectores para la física nuclear ha sido de gran importancia para el desarrollo de numerosos tipos de investigaciones, todos estos se han basado en el mismo principio fundamental, que es la transferencia de una parte o de toda la energía de la radiación incidente en la masa del detector, la cual es convertida en impulsos eléctricos.

El principio de detección de partícula de alta energía se basa en el centelleo, es decir una explosión de luz en el rango visible que se genera cuando dicha partícula interactúa con cierto tipo de compuesto químico, los centelladores comerciales son costosos y difíciles de conseguir, ya que deben ser contruidos bajo pedido y en grandes cantidades.

El presente trabajo de investigación pretende determinar si podemos producir un plástico centellador orgánico localmente, con materiales de bajo costo y técnicas de construcción a nuestro alcance, constituiría un gran avance en el desarrollo de prototipos de detectores de radiación.

Debido a esto nace la interrogante de saber si es posible producir un prototipo de centellador plástico para la detección de partículas de alta energía que tenga la misma eficiencia que un centellador comercial a costos más asequibles.

JUSTIFICACIÓN

La Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), junto a la Escuela Politécnica Nacional (EPN) y la Universidad San Francisco de Quito (USFQ), forman parte de la Colaboración LAGO (Latinamerican Gian Observatory) que es una comunidad de científicos que realizan investigaciones en el campo de detección de rayos cósmicos, física solar y clima espacial.

Una de las actividades de este grupo es el diseño y construcción de sistemas de detección de rayos cósmicos en la superficie terrestre. El presente trabajo de investigación contribuye directamente a este objetivo desarrollando nuestra propia tecnología en la construcción de plásticos centelladores para la detección de partículas de alta energía.

Este trabajo se realizará en colaboración con el Laboratorio de Detección de Partículas y Radiación (LEOPARD) de la Universidad San Francisco de Quito, centro de investigación y desarrollo de ciencia y tecnología en el área de detección de partículas. En el laboratorio se realiza

las siguientes actividades: investigación en el campo de astrofísica y física de altas energías, desarrollo de sistemas de detección de radiación y partículas.

La Escuela Superior Politécnica de Chimborazo cuenta con un Laboratorio de Técnicas Nucleares. Los resultados de esta investigación servirán al desarrollo de sistemas de detección de radiación ya sea de tipo ambiental como de fuentes radioactivas artificiales (tomógrafos de rayos X, aceleradores de partículas, etc.).

El trabajo de titulación tiene como finalidad utilizar estudios teóricos y aplicarlos experimentalmente, para fabricar un prototipo de centellador plástico de bajo costo basado en productos y técnicas existentes en el país que permita detectar partículas de alta energía para las aplicaciones antes descritas.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

- Determinar las condiciones y elementos necesarios para el desarrollo de centelladores plásticos para la detección de partículas de alta energía.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisión bibliográfica sobre la detección de la radiación por medio de centelladores plásticos.
- Determinar el estado actual en investigación y desarrollo sobre detectores de radiación.
- Analizar las características principales de un centellador plástico para medir radiación en aplicaciones de investigación científica.
- Determinar las condiciones y elementos necesarios para fabricar centelladores plásticos en el Ecuador.
- Establecer las características principales que debe tener un centellador plástico, además de las técnicas para su caracterización y validación.

CAPITULO I

1. MARCO TEORICO

1.1 Partículas de alta energía

Las partículas más energéticas de la naturaleza son los rayos cósmicos. Día a día somos bombardeados por una gran cantidad de partículas provenientes del Sol, del interior de la galaxia (Vía Láctea) y de fuentes lejanas; estos son los rayos cósmicos. La atmósfera filtra gran parte de esta radiación, produciendo cascadas de partículas secundarias que son detectadas por aparatos instalados en globos o sobre la superficie de la Tierra. (Solís, s.f.)

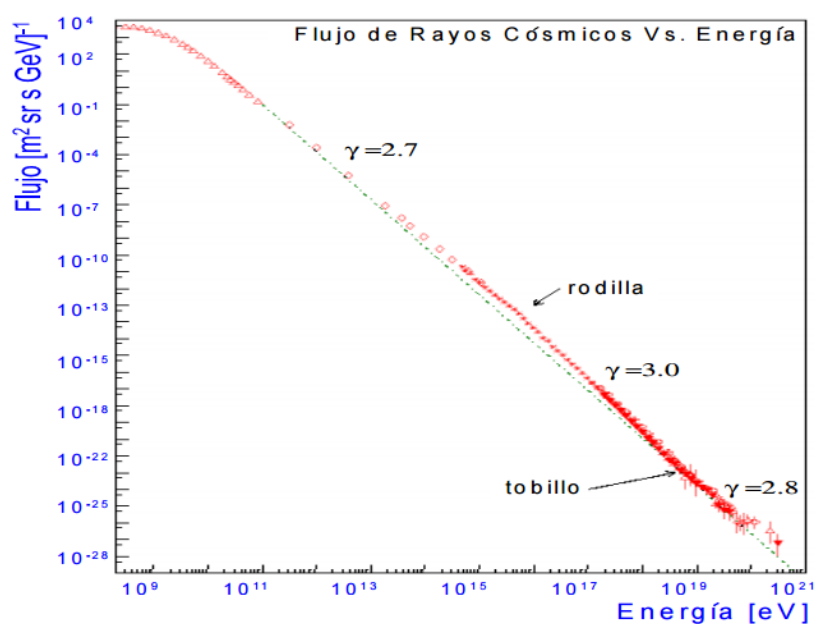


Figura 1-1. Espectro energético de rayos cósmicos.

Fuente: (Solís, s.f.)

La naturaleza y origen de los rayos cósmicos van a depender siempre de su energía. Los rayos cósmicos fueron descubiertos por el físico austriaco Viktor Hess hace aproximadamente un siglo, exactamente en 1912. La radiación cósmica es una herramienta importante en el estudio de propiedades de partículas subatómicas. Para el descubrimiento de partículas extrañas como el positrón (antipartícula del electrón), del muon y del pion. Se lo realizó estudiando la radiación cósmica con sistemas de detección muy sofisticados.

1.1.1 Rayos C3smicos

Los rayos c3smicos bombardean constantemente la superficie del planeta. Estas part3culas proceden de distintas regiones del Universo y son llamados rayos c3smicos, compuestos de protones, n3ucleos pesados, part3culas alfa, beta y radiaci3n gama. Incluyen part3culas secundarias como, fotones, neutrones y muones formados por interacci3n de part3culas primarias con gases de la atmosfera.

Por estas interacciones, la atmosfera sirve de escudo contra la radiaci3n c3smica. La radiaci3n c3smica primaria consta de part3culas cargadas, recibe la influencia del campo magn3tico terrestre. As3, los habitantes de latitudes altas reciben dosis eficaces de radiaci3n c3smica mayores que los que se encuentran m3s cerca del Ecuador. La variaci3n debida a este efecto es del orden del 10 %.(Carvajal, 2011)

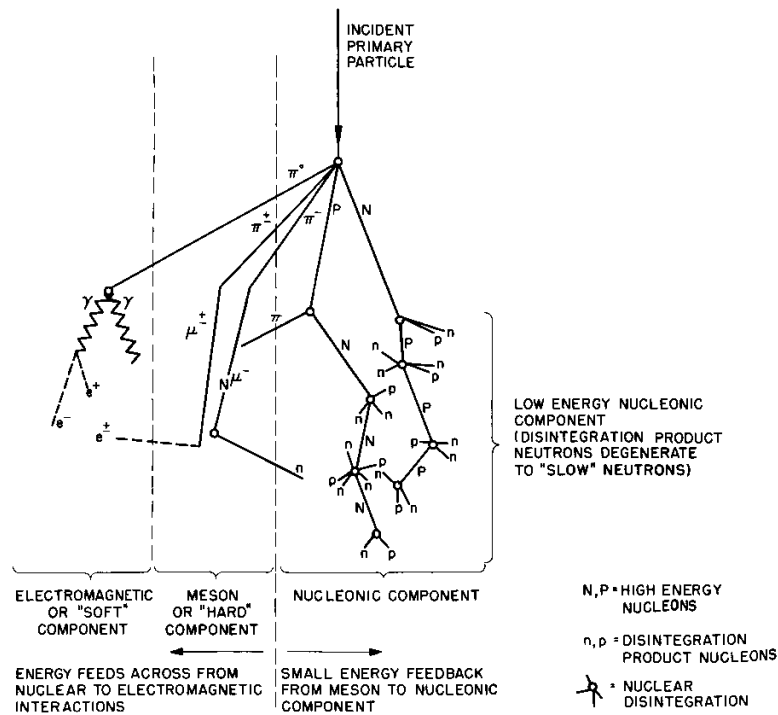
El estudio preciso de las propiedades de los rayos c3smicos (en particular de su energ3a, masa y carga el3ctrica) tiene ciertas dificultades y diversas t3cnicas experimentales han sido utilizadas desde su descubrimiento hace casi un siglo por V. F. Hess. La utilizaci3n de dispositivos instrumentales localizados en la superficie terrestre viene limitada por el hecho de que la radiaci3n c3smica atraviesa la atm3sfera (de unos 100 km de espesor) antes de llegar a los sistemas de detecci3n. Esto implica que, lo que realmente registran los detectores es el resultado de la degradaci3n de la radiaci3n c3smica primaria al atravesar el equivalente de 10 m de agua y es preciso reconstruir sus propiedades a partir de las cascadas de interacciones que se van produciendo en su recorrido a trav3s de la atm3sfera. Para rayos c3smicos primarios de muy alta energ3a estas cascadas pueden dar lugar a decenas de miles de part3culas secundarias.

1.1.2. Muones

Los muones son productos de la interacci3n de los rayos c3smicos primarios con los componentes de la atmosfera, son part3culas elementales, es decir no se descomponen en otras part3culas. Consta de un esp3n semientero, es decir de un fermi3n, lo mismo que el electr3n. Tienen gran capacidad de penetraci3n, son capaces de atravesar rocas a unos cuantos metros antes de detenerse, debido a que su masa es 200 veces mayor que la del electr3n 0,106 GeV.

Los muones aparecen de las interacciones primarios de los rayos c3smicos que se producen a partir de una lluvia de part3culas. Donde los rayos c3smicos provienen del espacio exterior y llegan constantemente a la tierra.

La cascada cósmica está compuesta por interacciones primarias y secundarias. En las interacciones primarias se encuentran los protones que interaccionan con la atmosfera perdiendo parte de su energía y dando como resultado e^\pm , rayos γ , π^\pm , μ^\pm y otras. Todas estas conocidas como partículas secundarias.



. Figura 2-1. Diagrama esquemático de la ducha de rayos cósmicos
Fuente: (Lab, 2000)

Los hadrones conforman el 1% de la cascada de Rayos Cósmicos debido a que son partículas más pesadas que no llegan a desintegrarse formando la componente hadrónica, que está constituida por piones, kaones y bariones. Esta componente no puede ser descrita por un método analítico, caso contrario que no sucede con la componente electromagnética.

Esta componente electrónica puede ser descrita con más precisión, evoluciona rápidamente alcanzando un máximo en el número de partículas. Los piones son los encargados de iniciar la cascada electromagnética a partir de la creación de fotones, electrones y positrones.

1.1.2.1 Interacción de muones con la materia

Los muones negativos que se detienen en el centellador, pueden enlazarse a núcleos de carbono y de hidrógeno del centelleo de la misma manera que hacen los electrones. Dado que el muón no es un electrón, el principio de exclusión de Pauli no lo impide de ocupar un orbital atómico ya lleno

de electrones. Tales muones negativos ligados a continuación, pueden interactuar con los protones antes de que espontáneamente decaigan.



En la actualidad hay formas de que un muón negativo desaparezca, la eficacia de los muones negativos en la materia es menor que el tiempo de vida de los muones de carga positiva, el cual no cuenta con el segundo mecanismo de interacción.

Los muones a altas energías se comportan más como electrones, por lo tanto, a altas energías las pérdidas radiactivas comienzan a dominar y los muones pueden transmitirse. En la figura 1.2 se observa el decaimiento del muón, decae a menudo en un neutrino de muón, antineutrino de electrones y un electrón. El W-bosón masivo es inestable y se descompone en el neutrino, antineutrino y el electrón. La flecha para el antineutrino electrónico corre hacia atrás a través del tiempo (hacia abajo) porque es una partícula de antimateria.

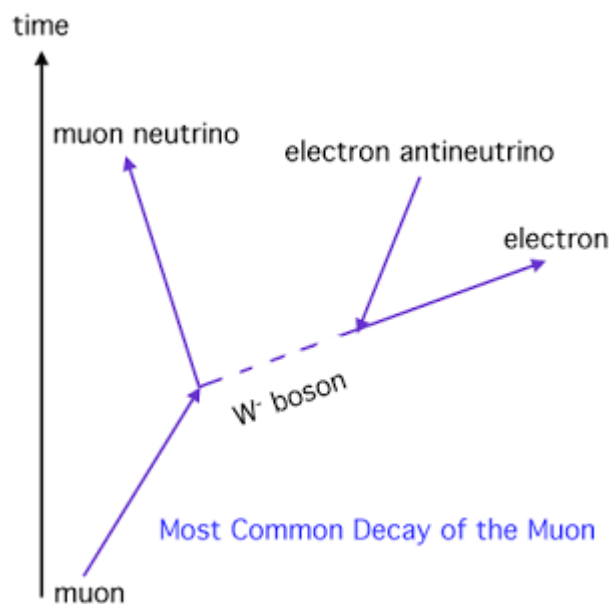


Figura 3-1. El muón decae a menudo en un neutrino de muón, antineutrino de electrones y un electrón.

Fuente: (McDonald & Kajita, 2015)

1.1.3 Partículas que detecta un centellador

El tipo de material del detector depende de la clase de radiación a estudiar y de la información que se busca obtener. Para detectar partículas alfa de desintegraciones radiactivas o partículas cargadas de reacciones nucleares a baja (MeV) energía, basta con detectores muy finos, dado que

el recorrido máximo de estas partículas en la mayoría de los sólidos es típicamente inferior a las 10 micras.

En el caso de los electrones, como los emitidos en las desintegraciones beta, se necesita de unos grosos para el detector de 0.1 a 1 mm. Sin embargo, para detectar rayos gamma puede que un grosos de 5cm resulte aún insuficiente para convertir estos fotones tan energéticos (MeV o superior) en un pulso electrón.

Para medir la energía de la radiación, se debe escoger un detector en donde la amplitud del pulso de salida sea proporcional a la energía de la radiación. Se debe elegir un material en el que el número de electrones sea grande para evitar que posibles fluctuaciones estadísticas afecten al valor de la energía. Para medir el tiempo de emisión, se debe seleccionar un material en el que los electrones sean recogidos rápidamente en un pulso, siendo el número de estos aquí menos importantes.

Para determinar el tipo de partícula (por ejemplo, En una reacción nuclear, en la que se pueden generar una gran cantidad de partículas), se debe elegir un material en el que la masa o carga de la partícula de un efecto distintivo.

En los centelladores la interacción entre las moléculas son relativamente débiles, y se puede ver sus propiedades en términos de los estados excitados discretos de las moléculas. Existen dos maneras en las que las moléculas absorben la energía: los electrones pueden ser excitados a estados electrónicos superiores (saltos entre niveles electrónicos) o bien los átomos de la molécula pueden empezar a vibrar (saltos entre niveles vibracionales). Las energías típicas vibracionales son del orden de 0.1eV, mientras que las energías de excitación electrónicas son del orden de unos pocos eV.

Los electrones excitados son generalmente aquellos que no están muy implicados en la ligadura de la molécula. En los hidrocarburos aromáticos, tales como los que presentan la estructura del anillo del benceno, tres de los cuatro electrones de valencia del carbono están en orbitales híbridos s que están localizados entre cada carbono, sus dos carbonos vecinos y un hidrogeno. El cuarto electrón, que está en un orbital p , no está tan localizados y no participa tanto en el proceso de ligadura entre los átomos como los electrones s . El electrón p es el responsable principalmente del proceso de centelleo.

La elección de uno u otro centellador dependerá principalmente del tipo de experimento que se va a realizar. Si se busca una alta eficiencia para rayos gamma se usa normalmente el NaI(Tl), dado

que la alta Z (53) del Yodo da una alta probabilidad para la absorción de fotones. Sin embargo, si se busca un corto tiempo de respuesta, el NaI(Tl) no es muy bueno, y los relativamente poco eficientes centelladores plásticos pueden ser una mejor elección.

1.2 Centelladores

Los centelladores son principalmente sensibles a electrones y fotones, pero un blindaje adecuado permite detectar a la componente muónica de los rayos cósmicos.

Las partículas de alta energía tienen baja probabilidad de interacción con la materia por lo cual son difíciles de observar, pero existen diferentes formas de detectarlos, en una de ellas se utilizan detectores de radiación orgánicos. Los detectores de centelleo son los más utilizados en aplicaciones nucleares y de partículas.

La base de la detección de la radiación mediante detectores centelladores es la interacción que tiene con ciertos materiales como agua, atmósfera y sólidos. Estos detectores producen modificaciones reconocibles cuando emiten un pequeño destello de luz. Es decir:

La radiación interactúa con la materia, excitando e ionizando un gran número de átomos y moléculas, las cuales, al volver a su estado fundamental, se desexcitan emitiendo fotones con rango de energía en el espectro visible o en los alrededores de él. La conversión de energía de excitación a luz es eficiente: a éstos los llamamos materiales centelladores. (Evitch, 2013)

El centellador debe ser capaz de absorber luz a una longitud de onda y remitirla en otra longitud de onda más grande. La gran mayoría de centelladores son sensibles a la emisión fluorescente del centellador primario, es necesario añadir un centellador secundario que absorbe la luz emitida por el centellador primario y la emite a una longitud de onda más grande.

Un detector centellador tiene un transductor que es un material centellante, el cual es el encargado de transformar la radiación entrante en luz visible. La luz visible se transforma en impulsos eléctricos mediante dos tipos de transductores: el tubo fotomultiplicador (PMT, photomultiplier tube) que utiliza el efecto fotoeléctrico y una serie de campos eléctricos para multiplicar los electro-fotones hasta que alcancen una corriente eléctrica detectable. Los SiPMs (fotomultiplicadores de Silicio) utilizan diodos sensibles a la luz que emiten corrientes proporcionales a la luz incidente.

1.2.1 Mecanismo de centelleo

Las partículas que interactúan con el plástico centellador entran, se frenan y decaen dentro del material. La desaceleración de esta partícula produce que el centellador excitado emita luz que es detectada por el PMT o SiPM, para brevedad de explicación cuando se mencione PMT se entiende que hablamos de los dos tipos de detectores.

Al entrar al PMT tales partículas tienen una energía total de sólo alrededor de 160 MeV. Después este PMT transforma de fotones a electrones, a su vez los electrones son multiplicados en los dinodos que contiene el PMT en su estructura interna, haciendo que se produzca una señal eléctrica proporcional a la energía depositada por la partícula.

En la figura 4-1. Se observa la generación de los dos pulsos de luz (Flechas cortas) utilizados en la determinación de la vida útil del muón. Un pulso de luz es del muón desacelerado (línea de puntos) y el otro es de su decaimiento en un electrón o positrón (línea ondulada).

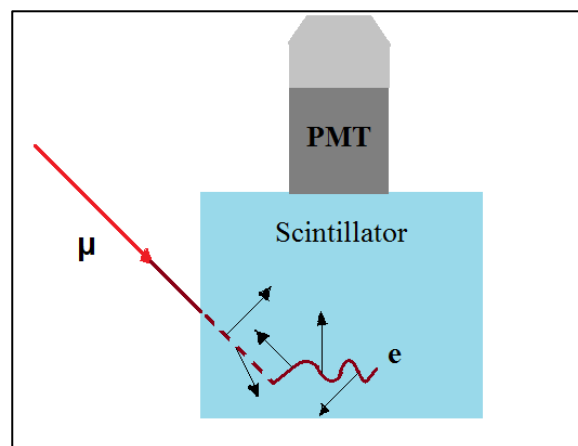


Figura 4-1. Generación de los dos pulsos de luz
Fuente: (Coan & Ye, 2005)

La luz de centelleo se genera por transiciones entre niveles energéticos de electrones de valencia. En la figura 5-1, se muestra un diagrama de energías de los centelladores orgánicos, donde se encuentra el estado fundamental S_0 , un estado excitado singlete de spin S_1 y otro triplete T_1 . La diferencia de energía entre niveles electrónicos está en el orden de los 3 eV, mientras que entre los subniveles vibracionales, se encuentran en el orden de los 0,15 eV.

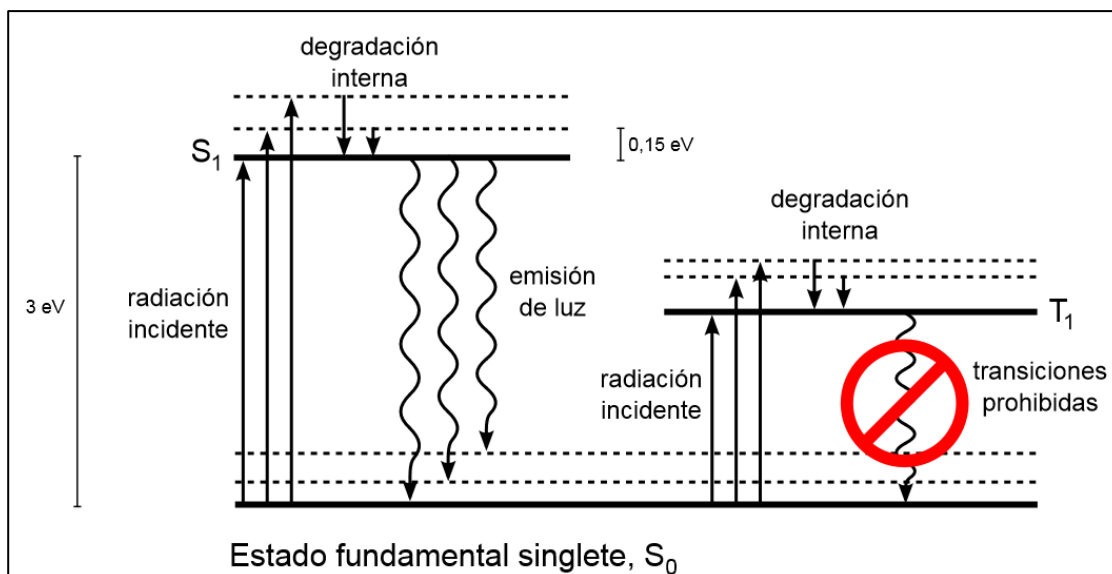


Figura 5-1. Niveles energéticos en una molécula de centellador orgánico.
Fuente: (Evitch, 2013)

1.2.2 Centelladores orgánicos

Los centelladores orgánicos consisten de un material centellador, llamado en forma coloquial flúor disuelto en un solvente base, recibe este nombre debido a que éste es el responsable de la fluorescencia. Los centelladores más frecuentes se encuentran en soluciones líquidas o en matrices poliméricas, dando lugar a los centelladores líquidos y a los centelladores plásticos. Los compuestos centelladores son hidrocarburos aromáticos, es decir, compuestos que contienen átomos de carbono ligados entre sí en forma de anillo. (Evitch, 2013). Entre los más extensamente utilizados se puede mencionar a PTP, B-PBD, PPO y POPOP compuestos de nombres químicos impronunciables. Sus fórmulas químicas son, $C_{18}H_{14}$, $C_{24}H_{22}N_2O$, $C_{15}H_{11}NO$ y $C_{24}H_{16}N_2O_2$, respectivamente. Son materiales ricos en carbono y en hidrogeno, cuyo número atómico promedio esta entre 3,5 y 5, pero a su vez son materiales de precio elevado. (Evitch, 2013)

Para una buena y correcta fabricación de un centellador plástico se necesitan de 3 componentes. El primer componente es un monómero líquido que es transparente, un estireno comercialmente disponible con una pureza del 99.5%. El segundo es vendido comercialmente como 2,5 - difeniloxazol (es decir, PPO) en forma de un polvo blanco y es una sustancia centellante cuya longitud de onda de emisión máxima es de 303 nm. El tercer componente es POPOP {1,4 - bis [2-(feniloxazolil)] - benceno} que es un material amarillo claro es utilizado como un cambiador de longitud de onda también es llamado centellador secundario, es decir, que convierte luz de longitud de onda más corta a luz de longitud de onda más larga.

1.2.3 Condiciones de un buen detector de centelleo

Existen muchos materiales centelladores, pero no todos son utilizables como tal. Para que un detector sea bueno, debe cumplir con ciertas condiciones.

- Convertir, en forma lineal, la energía de la radiación incidente en luz detectable, de modo que la intensidad de la luz sea proporcional a la energía depositada en un amplio rango de longitudes de onda.
- El medio debe ser transparente a la longitud de onda de su propia emisión para obtener una buena colección de luz.
- El tiempo de decaimiento de la luminiscencia inducida debe ser corto para que los pulsos de la señal producida sean rápidos.
- El material debe tener buena calidad óptica y poder ser fabricado en tamaños grandes, compatibles con los requerimientos experimentales.
- El material debe tener un índice de refracción cercano al del vidrio (1,5) para que el acoplamiento óptico con el fototubo sea bueno.

Hay que tener claro que no todos los materiales van a satisfacer todos los criterios. Actualmente existen seis tipos de materiales usados como detectores: cristales orgánicos, líquidos orgánicos, plásticos, cristales inorgánicos, gases y vidrios. Uno de los materiales que es más usado en la detección de fotones es el yoduro de sodio activado con talio, NaI (Tl), otro usado es el fluoruro de bario BaF₂. Para detectar neutrones se suele emplearse materiales orgánicos plásticos, siendo los más importantes el antraceno y el estireno. Para la detección de muones, los más utilizados son los centelladores plásticos.

1.3 Centelladores Plásticos

Los centelladores plásticos pueden ser considerados como soluciones sólidas de centelladores orgánicos. Presentan una gran ventaja en comparación con centelladores líquidos estos no necesitan de un recipiente, y pueden ser utilizados en distintas formas y tamaños.

A su vez este tipo de centelladores presentan la ventaja de poder ser utilizados directamente sobre cualquier muestra radiactiva. La mayoría de los centelladores plásticos tienen una densidad de 1.03 g/cm³ y un índice de refracción de 1.58.(Fernow, 1986). Los centelladores plásticos corresponden a la categoría más extendida de centelladores utilizados para la detección de radiación cósmica.

Comercialmente los plásticos centelladores son sencillos de fabricar y se pueden obtener en diversas geometrías, barras de diversas secciones, cilindros, prismas, finas láminas. Por su carácter de ser centellador orgánico, todos los tipos de centelladores plásticos tienen un tiempo de decaimiento corto.

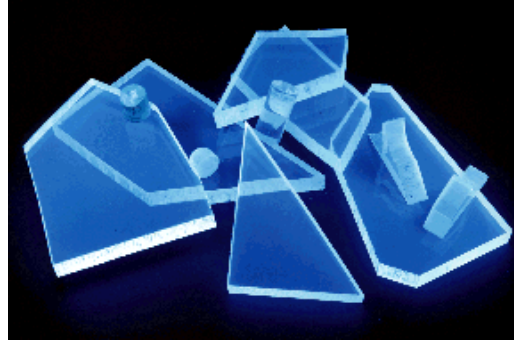


Figura 6-1. Centelladores plásticos de diferentes geometrías
Fuente: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

1.3.1 Mecanismo físico de funcionamiento

Cuando una partícula ionizante atraviesa el centellador, el material primario emite en el UV, espectro en el cual el camino libre medio de la luz en el plástico es de unos pocos milímetros. El wavelength shifter absorbe los fotones UV y reemite en una longitud de onda más larga. Según lo demande la aplicación, se puede agregar un segundo wavelength shifter, para ajustar el espectro de la luz de centelleo con la respuesta espectral del fotodetector. (Evitch, 2013)

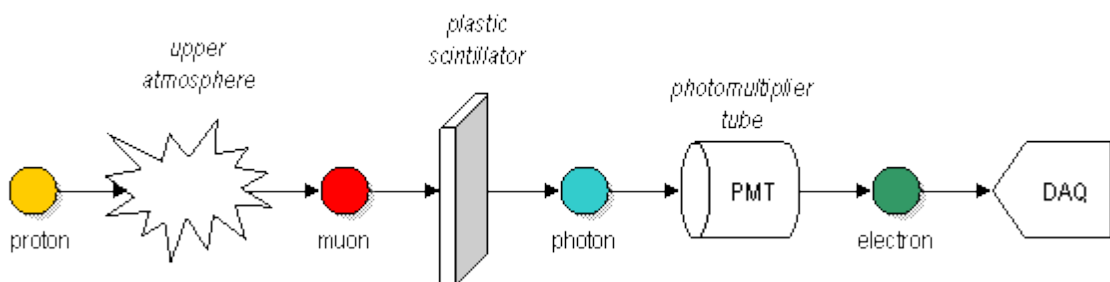


Figura 7-1. Mecanismo de detección
Fuente: (Lab, 2000)

Por lo menos se necesitan dos detectores colocados uno encima del otro, alimentándose en la electrónica que permite monitorear la coincidencia entre los dos detectores rápidamente así potencialmente filtrando hacia fuera la mayoría de la radiación terrestre.

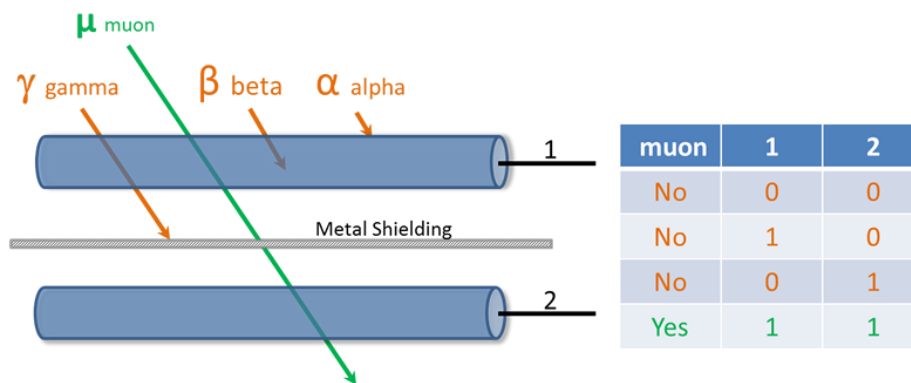


Figura 8-1. Ilustración de dos detectores puestos para captar solamente radiación cósmica, impidiendo captar radiación terrestre. Dos detectores es más probable que se trate de un evento cósmico que terrestre.

Fuente: (Hart, s.f.)

En la práctica así es como funciona el sistema. El centellador plástico se acopla usando el pegamento óptico y los accesorios formados a PMTs. Los centelladores están cubiertos con material reflectante (papel de aluminio) y luego con papel negro y cinta adhesiva. Se conectan al DAQ (del inglés Data Acquisition) que se conecta con una computadora. Cuando un muón de rayos cósmicos pasa a través del centellador, provoca que unos pocos fotones sean emitidos por impurezas en el material del centellador. Estos son recogidos por los PMTs, convertidos a un pulso eléctrico y amplificados. Cada PMT envía su señal al DAQ.



Figura 9-1. Experimento realizado en Fermilab al acoplar 4 centelladores conectados por un sistema electrónico para recibir la señal detectada en el QuarkNet.

Fuente: (FermiLab, 2002)

Cuando se cuentan los muones, el DAQ busca "coincidencias" -dos señales (una de cada PMT) que se reciben en un tiempo muy corto. Estos se informan a la computadora, todas las otras

señales son vetadas como probable ruido de los PMTs. La computadora puede contar el número de muones que vienen en un intervalo para obtener un recuento de velocidad.(FermiLab, 2002)

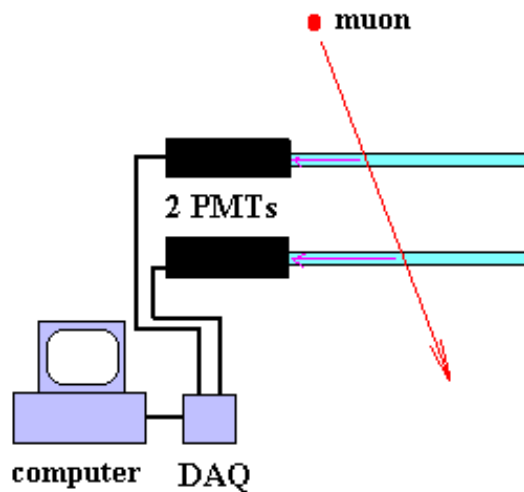


Figura 10-1. Diagrama de funcionamiento físico de centelladores plásticos para recibir la señal en un computador.

Fuente: (FermiLab, 2002)

1.3.2 Aplicaciones

En muchas aplicaciones se desea trabajar con centelladores de gran área. Por razones de costos, generalmente, los fotodetectores poseen un área menor que la de los centelladores plásticos. Con el objetivo de que al fotodetector llegue la mayor cantidad de luz de centelleo, se debe utilizar las llamadas guías de luz. El principio físico explotado para esto es la reflexión total interna. Una geometría muy utilizada para detectar partículas cargadas por medio de centelladores plásticos.

En la figura 11-1, el esquema superior tiene una guía de luz de acrílico macizo, el cuál dirige los fotones de centelleo hacia el fotomultiplicador. En el inferior, la luz es transportada hacia el PMT a través de un arreglo de fibras ópticas.

Mediante argumentos de conservación del volumen del espacio de fases (teorema de Liouville), se puede mostrar que el flujo de fotones es “incompresible”. Un flujo dado en la entrada de una guía de luz no puede ser concentrado en un área transversal menor en la salida. Si el área de salida de la guía de luz es menor que el área de entrada, y si el cambio de área transversal es suave, entonces la intensidad de la luz de salida se reducirá según la relación de las áreas.(Evitch, 2013)

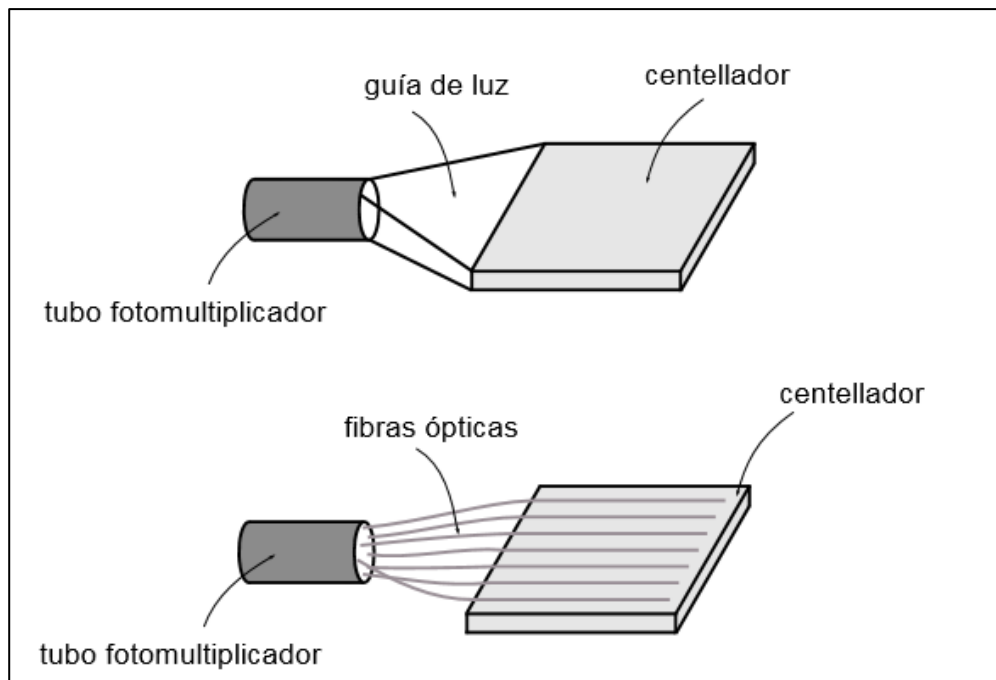


Figura 11-1. Montaje frecuentemente utilizado para montar un centellador de gran área con un PMT mediante una guía de luz maciza o fibras ópticas
Fuente: (Evitch, 2013)

Para no tener pérdidas de aplicaciones en áreas grandes donde se requieran centelladores, se utiliza una guía de luz de plástico que se encuentra dopado con un wavelength shifter, el cual absorbe fotones y los reemite en una longitud de onda más larga. Así, la restricción de la “incompresibilidad” no se aplica, y es posible guiar a la luz del centelleo en forma eficiente. El wavelength shifter puede ser incorporado tanto en las fibras ópticas como en las guías de luz de plástico maciza.

1.4 Métodos físicos y químicos para la caracterización de centelladores plásticos

1.4.1 Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

El DSC es una técnica termoanalítica en la que la diferencia de la cantidad de calor es necesaria para aumentar la temperatura de una muestra, la referencia se mide como una función de la temperatura. Tanto la muestra y la referencia se mantienen casi a la misma temperatura en todo el experimento. Generalmente, el programa de temperatura para un análisis DSC se encuentra diseñado donde la temperatura del soporte de muestra aumenta linealmente como una función del tiempo. La muestra de referencia debe tener una capacidad de calor en el rango de temperaturas a escanear.

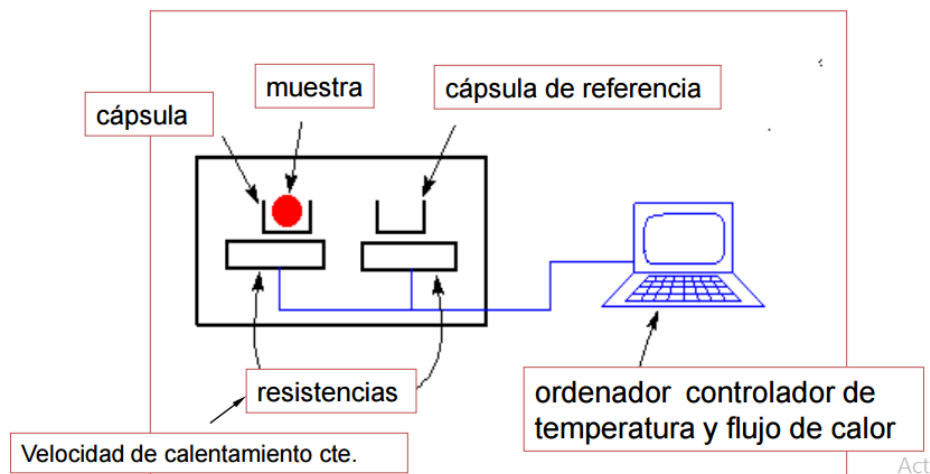


Figura 12-1. Simulación de la Calorimetría Diferencial de Barrido DSC
 Fuente:(Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2011)

Resumiendo, se puede decir que la calorimetría diferencial de barrido es una técnica empleada para estudiar qué ocurre cuando un polímero es calentado, es decir, es utilizada para analizar transiciones térmicas de un polímero. Las transacciones térmicas son cambios que se producen cuando a un polímero se lo calienta, cuando es mantenida a temperatura constante, durante un tiempo determinado, o cuando es calentada o enfriada a velocidad constante, en un determinado intervalo de temperaturas.

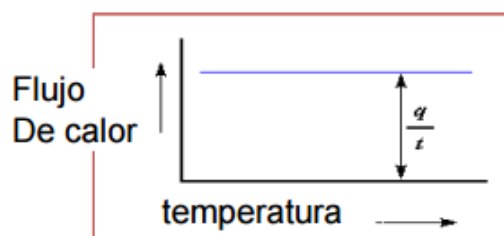


Figura 13-1. Ejemplo de un termograma de una sustancia o polímero.
 Fuente:(Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2011)

El principio básico de esta técnica es que, cuando la muestra sufre una transformación física tal como transiciones de fase, más (o menos) el calor fluye hacia la referencia para mantener ambos la misma temperatura. Si más o menos calor debe fluir a la muestra depende si el proceso es exotérmico o endotérmico. Observando la diferencia entre el flujo de calor entre la muestra y la referencia, los diferenciales de los calorímetros de barrido son capaces de medir la cantidad de calor absorbido o liberado durante dichas transiciones.

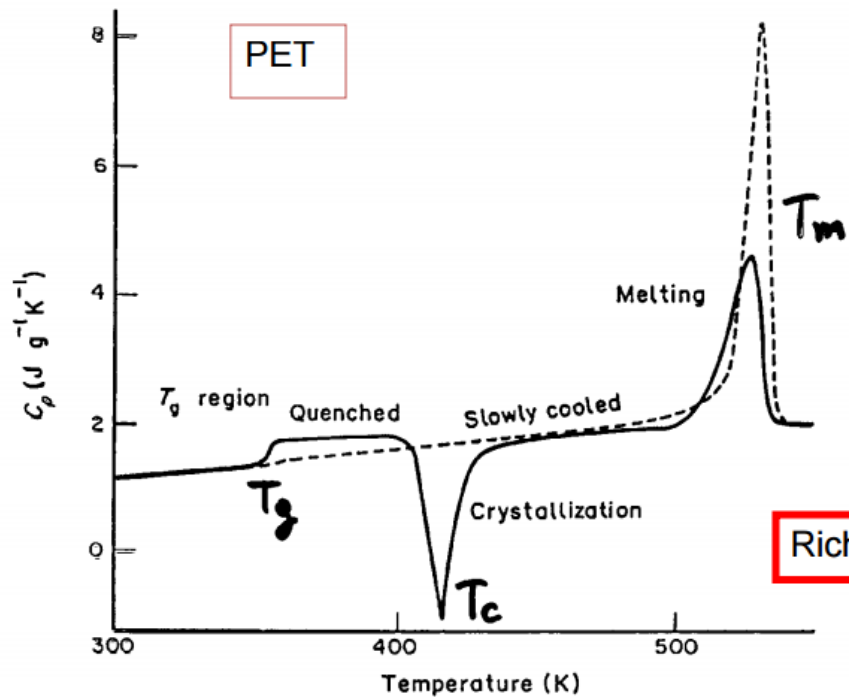


Figura 14-1. Termografía típica de un polímero.
Fuente: Richardson, 1989.

El resultado que muestra la técnica de DSC es una curva de flujo de calor vs temperatura. Esta técnica se logra utilizar para medir una serie de propiedades de características como son: temperatura de cristalización de sólidos, estabilidad oxidativa de muestras utilizadas en la industria de polímeros, transiciones térmicas de un polímero: (transición vítrea, fusión, cristalización.). La mayoría de los calorímetros miden flujo de calor relativo. Miden la diferencia de temperatura entre una muestra y la de referencia y lo convierten a flujo de calor.

1.4.2 Análisis Termogravimétrico (TGA)

La técnica de Análisis Termogravimétrico, mide la cantidad y rapidez del cambio en peso de una muestra en función de la temperatura y/o del tiempo en una atmósfera controlada. De manera general, permite realizar medidas para determinar la composición de los materiales y predecir su estabilidad a temperaturas de hasta 1500 °C. Esta técnica puede, por tanto, caracterizar materiales que presentan pérdida o ganancia de peso debido a la descomposición, oxidación o deshidratación. (Calvo & Maldonado, 2008)

En la figura 15-1, se muestra un ejemplo de termograma con relación a la temperatura en función del peso.

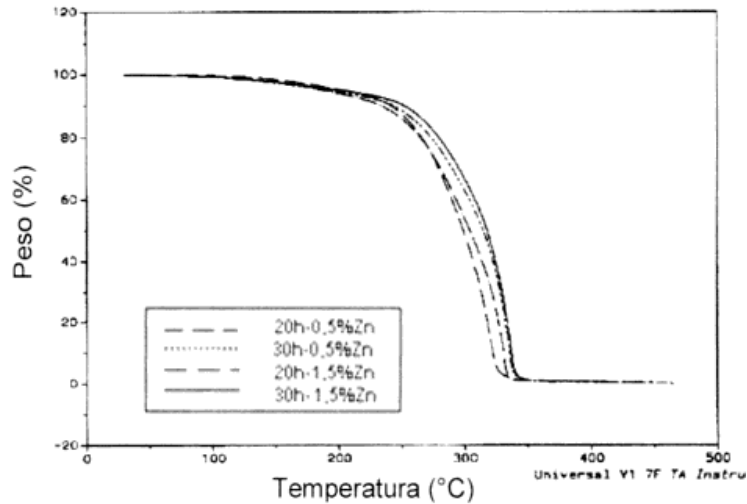


Figura 15-1. Termogramas TGA de las muestras de polímero realizadas en la investigación para aplicaciones biomédicas.

Fuente: (Parada, et al., 2009)

Dentro de las aplicaciones del análisis termogravimétrico se tiene:

- Control de calidad. Efecto de aditivos
- Estabilidad térmica en atmósfera inerte
- Oxidación en aire o atmósfera rica en oxígeno
- Degradación térmica de polímeros
- Estudios de cinética de degradación y análisis de los productos
- Identificación de materiales

1.4.3 Análisis Termomecánico TMA

Análisis Termomecánico (TMA) es aquel que mide los cambios lineales o volumétricos en las dimensiones, como función del tiempo, temperatura y fuerza en una atmósfera controlada. (Caceres, s.f.)

Muchos materiales experimentan cambios en sus propiedades termomecánicas en su calentamiento o enfriamiento. Por ejemplo, cambios de fase, fases de sintetización o ablandamiento pueden producirse además de la expansión térmica. El Análisis Termomecánico (TMA) puede aportarnos información valiosa sobre la composición, estructura, condiciones de producción o posibilidades de aplicación para distintos materiales. El Análisis Termomecánico (TMA) determina cambios dimensionales de sólidos, líquidos y materiales pastosos en función de la temperatura y/o tiempo bajo una fuerza mecánica definida. Es cercano a la Dilatometría (dilatómetro vertical), que determina los cambios de longitud de muestras bajo carga negligible.

1.4.4 Espectrometría de luz Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

FTIR está basada en los principios de la espectroscopia molecular. El principio básico de la espectrometría molecular es que las moléculas absorben energía de la luz en longitudes de ondas específicas, conocidas como sus frecuencias de resonancia (vibración). (Anon., 2014)

Un espectrómetro infrarrojo funciona con una pequeña muestra, la cual es colocada en una celda infrarroja, donde es sometida a una fuente de luz infrarroja, la cual hace un barrido desde las longitudes de onda de 4000 cm^{-1} hasta 600 cm^{-1} . La intensidad de la luz transmitida a través de la muestra es medida en cada número de onda, lo que permite que la cantidad de luz absorbida por la muestra sea calculada por la diferencia entre la intensidad de la luz antes y después de pasar por la celda de muestra. Esto se conoce como el espectro infrarrojo de la muestra. (Anon., 2014)

Al aplicar esta técnica se puede detectar las impurezas del material analizado por ejemplo átomos de hidrógeno formando enlaces OH, NH, SiH, entre otros. Es posible cuantificar el número de enlaces presentes en la muestra conociendo la absorptividad asociada al tipo de enlace correspondiente. Conocer la composición química de la muestra se logra aplicando esta técnica para reconocer del material que se esté tratando y como está compuesto químicamente.

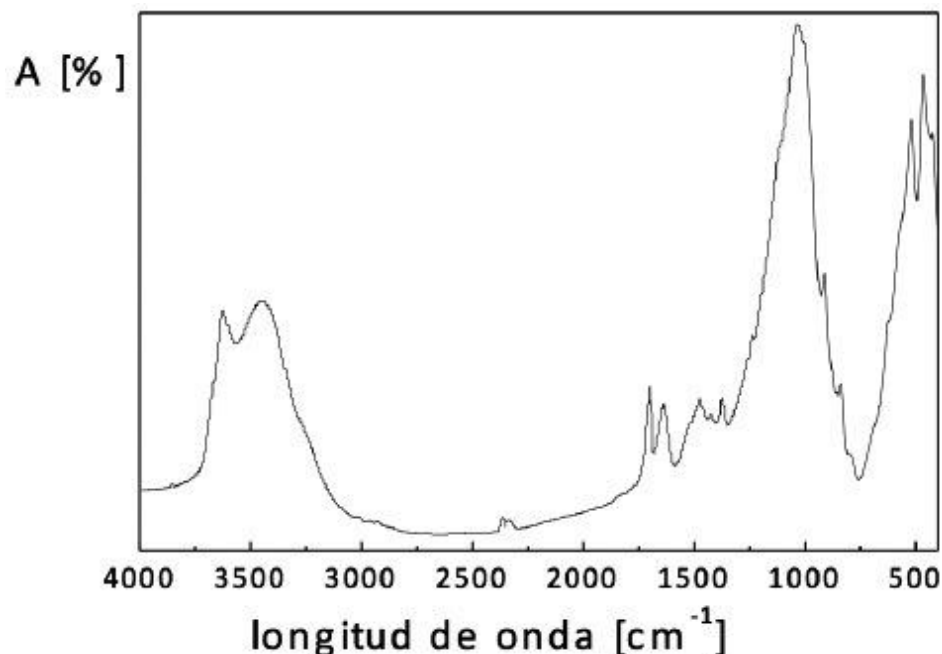


Figura 16-1. Diagrama de Espectro FTIR en función de la longitud de onda vs la absorbancia

Fuente: (Piqué & Vázquez, 2012)

1.5 HIPÓTESIS Y VARIABLES

1.5.1 Hipótesis General

La construcción de un prototipo de centellador plástico de bajo costo permitirá la detección de radiación de partículas de alta energía.

1.5.2 Identificación de Variables

- Variable independiente: Prototipo de centellador plástico de bajo costo.
- Variable dependiente: Detección de radiación de partículas de alta energía.

Operacionalización de Variables

Variable independiente	Definición conceptual	Dimensión	Indicador	Índice
Prototipo de centellador plástico de bajo costo.	Un centellador es un material que exhibe luminiscencia cuando por él, pasa radiación ionizante (electrones, positrones u otras partículas o iones más pesados). Esto se produce porque el material absorbe parte de la energía de la partícula incidente y la remite en forma de un corto destello de luz, típicamente en el rango de la luz visible. En nuestro caso utilizamos materiales de fácil obtención en el país.	Luminiscencia del material debido a la interacción con las partículas de alta energía.	Resina, estireno, mek, octoato de cobalto.	Mililitros
Variable dependiente	Definición conceptual	Dimensión	Indicador	Índice
Detección de radiación de partículas de alta energía.	Las partículas de alta energía son cualquier tipo de partícula subatómica que se desplaza a velocidades cercana a la luz.	Detección de radiación de las partículas.	Flujo de partículas de alta energía	Partículas por metro cuadrado por segundo

CAPITULO II

2. MÉTODOS Y TÉCNICAS

2.1 Tipo y diseño de investigación

Esta investigación es de tipo descriptivo y experimental, ya que se realizarán estudios preliminares en donde se detallarán las características y propiedades de los centelladores como detectores de radiación, posterior a ello, se elaborará un prototipo de centellador plástico, en el cual se efectuarán pruebas para el correcto funcionamiento del mismo. Los datos serán tomados varias veces, y a su vez serán recolectados, almacenados, procesados y analizados en el laboratorio LEOPARD.

2.2 Periodo y lugar donde se realizó la investigación

La investigación se realizó en laboratorios de física y química, en el laboratorio LEOPARD de detección de partículas, de la Universidad San Francisco de Quito se hizo la verificación del funcionamiento de las muestras al emplear un sistema electrónico. Mientras que los laboratorios de Bioquímica tanto de la Universidad San Francisco como de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, se efectuó los procedimientos para obtener las muestras de los centelladores plásticos. Todo esto se llevó a cabo durante un periodo de seis meses.

2.3 Materiales

Muestras de referencia de tres tipos de centelladores de diferentes aspectos. Para la elaboración de los prototipos se utilizó una probeta de 100ml, un vaso de precipitación de 250 ml, una varilla y un reverbero con agitador magnético.

Los materiales utilizados debieron ser fáciles de conseguir en el mercado con un bajo costo para esto se compró: Resina, Estireno, Octoato de Cobalto y Peróxido de Metil Etil Cetona (MEK). Cada una de los prototipos fueron puestos en un vaso plástico de 250ml.

2.4 Procedimientos

Se contó con tres tipos de centelladores de diferentes aspectos para ser utilizados como centelladores de referencia. En la tabla 1-2, se establecen los tipos de centelladores de referencia con sus características físicas a simple vista.

Tabla 1- 2. Aspectos Físicos de los centelladores de referencia existentes en el laboratorio LEOPARD

Muestra de Referencia	Color	Aspecto
Muestra 1	Sin Color	Transparente
Muestra 2	Verde	Transparente
Muestra 3	Sin Color	Transparente

Realizado por: Caterine Carrasco ;Kelmy Díaz. 2017

En el laboratorio de Mecánica de la USFQ los centelladores de referencia se cortaron en muestras de 1x1 cm y 0.5 x 0.5 cm. Obteniendo 10 muestras por cada tipo de centellador. Las muestras fueron etiquetadas como: muestra1, muestra2 y muestra3.

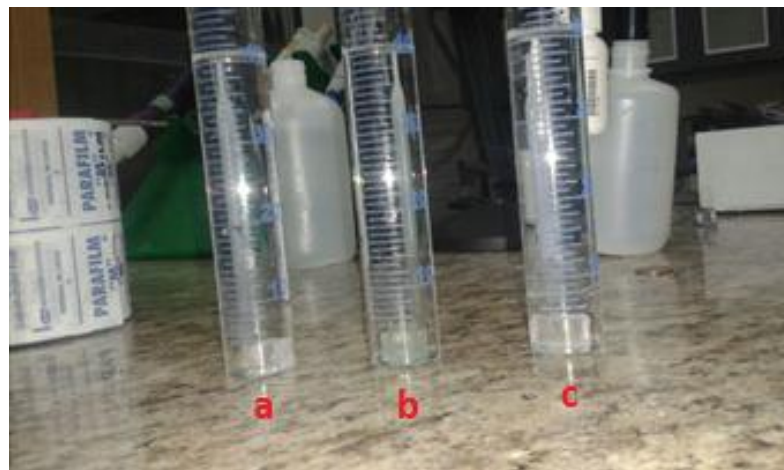


Figura 1- 2. Medida de Densidad de las tres muestras de referencia.

a) Muestra1 b) Muestra2 c) Muestra 3.

Fuente: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

Para la caracterización de las muestras de referencia se realizaron: pruebas físicas y químicas. Dentro de las pruebas físicas se realizó la obtención de la densidad de cada muestra, se pesó cada una de ellas y con una probeta de 100ml, se llenó hasta los 60ml con agua, midiéndose la variación de volumen.

Para la densidad se utiliza la ecuación:

$$C = \frac{A \pm \Delta A}{B \pm \Delta B} = C \pm \Delta C \quad (1-2)$$

En donde:

$$C = \frac{A}{B} \quad Y \quad \Delta C = Cx \left(\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} \right) \quad (2-2)$$

El valor obtenido se comparó con los valores de la tabla, del [Anexo A](#), que corresponde a propiedades establecidas para distintos tipos de centelladores plásticos.

El siguiente paso fue realizar las pruebas químicas efectuándose ensayos de DSC, TGA y FTIR con la colaboración de la Escuela Politécnica Nacional y la Universidad de Cuenca, ensayos que sirvieron para obtener la temperatura de fusión y la composición química específicamente el monómero de las muestras de referencia. Para obtener los resultados de FTIR se utilizó el [Anexo D](#).

2.4.2 Elaboración del prototipo

Se dividieron en un total de 5 experimentos, en todos los experimentos se ocupó un vaso de plástico de 250ml, una varilla para homogenizar los componentes. Una vez terminado cada procedimiento la mezcla obtenida se la dejó reposar en el mismo vaso de plástico.

- a) *Muestra1*: Se mezcló 50ml de estireno con 50ml de resina en el vaso de plástico de 250ml, con la varilla se combinó los dos componentes durante 4min aproximadamente, hasta obtener una sustancia líquida y disolver totalmente la resina, haciendo que pase de un estado espeso a un estado más fluido.

Una vez obtenida la consistencia deseada de los dos componentes antes mencionados, se añadió 0,10 ml de octoato de cobalto, mientras se seguía removiendo la mezcla durante 1 min. 0,4 ml de peróxidos de metil etil cetona (mek) se añadió en último lugar y se homogenizó toda la mezcla por 2 minutos.

- b) *Muestra2*: Se realizó el mismo procedimiento que en el literal a), pero en este caso no se utilizó estireno, sino solo se ocupó 50ml de resina disuelto en 0,20ml de octoato de cobalto y 0,4ml de mek.
- c) *Muestra3*: Para la homogenización de los componentes solamente se utilizó 50ml de estireno disuelto en 0,20ml de octoato de cobalto y 0,8ml de mek.

- d) *Muestra4*: A 50ml de estireno se añadió 2ml de mek agitando la mezcla durante 1 minuto, se añadió 50ml de resina se volvió a agitar durante 1 minuto más, a la mezcla se colocó 5ml de resina agitándola durante 1 minuto, por último, se colocó 2ml de mek y durante 1 minuto se agitó la mezcla.
- e) *Muestra5*: En un vaso de precipitación de 250 ml, se homogenizó 100ml de estireno con 110 ml de resina, meciendo la mezcla durante todo el proceso, seguido se añadió 8ml de mek y se continuó agitando la mezcla durante 1 minuto.

La mezcla se puso a baño maría utilizando un reverbero con agitador magnético, puesto a una temperatura de 200°C, y el agitador magnético a una velocidad de 60rpm durante 1 min y 125rpm por 1 minuto más. La temperatura se mantuvo durante 45 min, logrando la polimerización.



Figura 2-1. Realización de las muestras 1, muestra 2 y muestra 3.
Fuente: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017



Figura 3-2. Realización de las muestras 4 y muestra 5. Utilización de una probeta de 50ml para medir la cantidad de estireno.

Fuente: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017



Figura 4-2. Proceso de homogenización utilizando la varilla y removiéndolos durante 4 minutos.

Fuente: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017



Figura 5-2. Proceso de baño maría, para la muestra 5.

En la figura de la izquierda se traslapa la mezcla desde la tarrina a un vaso de precipitación de 250ml. La figura de la derecha muestra la mezcla muestra puesta en un reverbero con agitador magnético a una temperatura de 200°C, durante todo el proceso y el agitador magnético a una velocidad de 2 y 4 que es equivalente a 60 y 125 rpm, durante 2min.

Fuente: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

Todos los experimentos fueron dejados secar al aire libre. Las muestras 1y 2, se dejaron secar durante 48 horas, la muestra 3 requirió de 96 horas para que esté completamente sólida, la muestra 4 necesito de 3 semanas para llegar a su solidez y la muestra 5 necesito de una semana. En la tabla 2-2, se detallan los valores utilizados para cada muestra.

Tabla 2-2. Cantidad de los componentes a utilizar para la elaboración del centellador prototipo.

Muestras de los prototipos	Estireno (ml)	Resina (ml)	Octoato de cobalto (ml)	Mek (ml)
Muestra 1.	50	50	0,10	0,4
Muestra 2.	_____	50	0,20	0,4
Muestra 3.	50	_____	0,20	0,8
Muestra 4.	50	55	_____	4
Muestra 5.	100	110	_____	8

Realizado por: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

Una vez que las muestras (prototipos) adquirieron un aspecto sólido, fueron minuciosamente pulidas para ser puestas en prueba de funcionamiento.

2.4.3 Pulido de las muestras

Se utilizaron lijas de distintos milímetros: 80, 100, 200, 400, 600, 800, 1000 y 1200. A partir de la lija de 800 se utilizó un sistema de fluido de agua para quitar líneas que fueron producidas en el momento de utilizar lija N° 80. Utilizando albúmina y un equipo pulidor se sometió a cada muestra a pulirla durante 4 horas aproximadamente hasta obtener la total transparencia.

Para verificar si los diseños experimentales tienen la característica de ser centellantes se hizo el análisis de FTIR para obtener la composición química y comparar con las muestras de referencias que antes, ya se había realizado el análisis de composición química específicamente del monómero.



Figura 6-2. Técnica del pulido de las muestras en sus caras opuestas utilizando el equipo pulidor
Fuente: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

2.4.4 Prueba de Funcionamiento

Para comprobar si los prototipos-muestras estaban funcionando, es decir, actúan como detectores se necesitó utilizar una muestra de control, que esté conectada al SiPMs y está a su vez conectada al osciloscopio y a una fuente de energía, conectado por un sistema electrónico utilizando un Protoboard. Esta misma estructura debió tener cada muestra para comprobar la señal entre la muestra de control y la muestra-prototipo.

Tanto la muestra de control como la muestra-prototipo debieron ser selladas totalmente, utilizando fundas negras o a su vez utilizando papel aluminio, evitando que existan fugas de luz.

El gráfico 1-2, es un esquema, en donde se muestra cómo se encuentra conectadas las muestras al osciloscopio para la comprobación de funcionalidad.

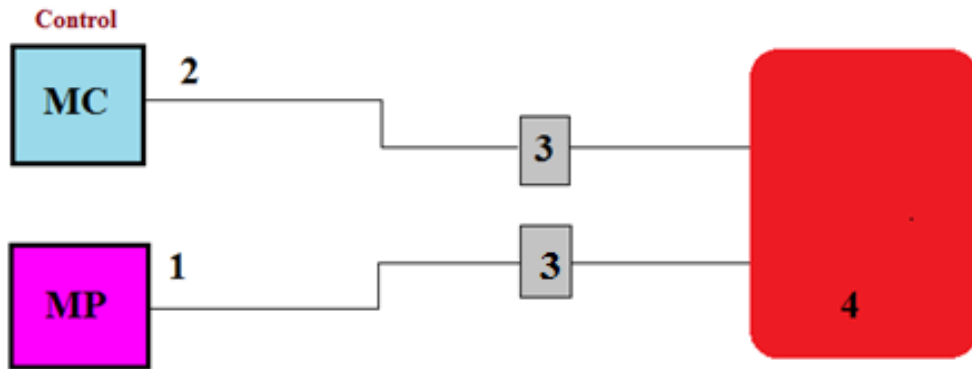


Gráfico 1- 2. Esquema de funcionamiento de los prototipos.

1. Muestra-Prototipo (MP), 2. Muestra de Control (MC), 3. SiPMs, sistema electrónico, 4. Osciloscopio.

Fuente: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

En la figura 7-2, se observa la muestra-prototipo, envuelta en papel aluminio una vez que ha sido anteriormente limpiada con alcohol en sus caras anterior y posterior para adherirle el SiPMs en una de sus caras.



Figura 7- 2. Colocación del SiPMs en una de las muestras-prototipo

Fuente: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

En la figura 8-2, se observa la puesta en marcha de la muestra prototipo y la muestra de control. El osciloscopio será el encargado de mostrar una señal. Para lo cual, primero se realizó la puesta en marcha de dos centelladores de referencia, por lo que se observará una señal como se observa en la figura 9-2.



Figura 8-2. Puesta en marcha del prototipo
Fuente: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

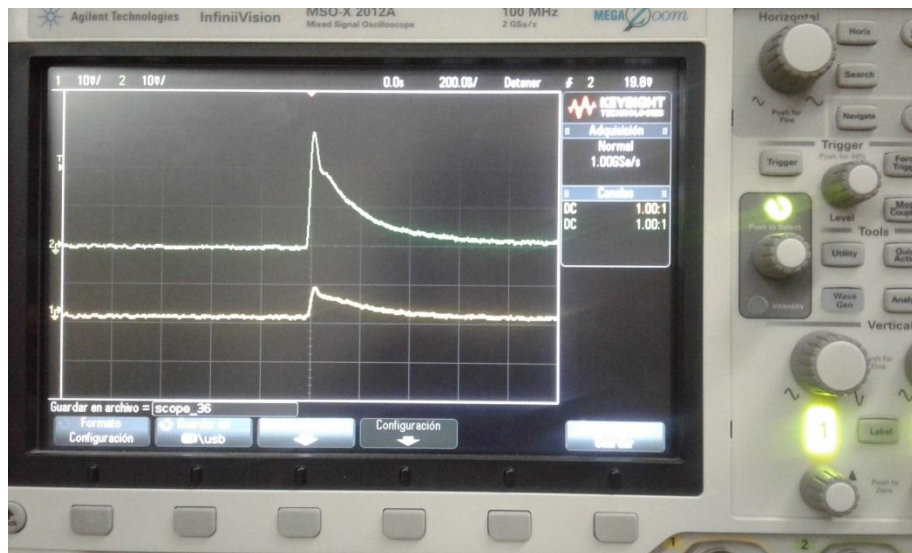


Figura 9-2. Señal en el osciloscopio de los dos centelladores.
Fuente: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

2.4.5 Equipos

Se utilizó un reverbero con agitador magnético marca Fisher Scientific.

Un equipo pulidor marca Dual SpeedGrinderPolisher, modelo MoPao 160, serie No. 106789.

CAPITULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Pruebas de caracterización Físicas y Químicas

3.1.1 Valor de la densidad

En la tabla 1-3, se representan las densidades obtenidas para cada muestra. Al comparar los resultados de densidad obtenidos con los reportados en la tabla del [Anexo A](#), las muestras 2 y 3 representan valores de densidad parecidos a los reportados para el centellador EJ-204.

Tabla 1- 3. Tabla de densidades para muestras de centelladores plásticos de 1x1 cm³

Muestras	Densidad (g/cm ³)	Error %	tipo
Muestra 1	0,872233333	0,00087323	
Muestra 2	1,020033333	0,00102103	
Muestra 3	1,011866667	0,00101287	EJ-204

Realizado por: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

3.1.2 Calorimetría Diferencial de Barrido DSC

Se pueden observar picos endotérmicos asociados a transiciones de primer orden, las muestras presentaron algún grado de cristalinidad. En los tres gráficos (Gráficos 1-3, 2-3, 3-3) la temperatura de transición vítrea se dio aproximadamente a 25°C. El gráfico 1-3 que es el análisis de la muestra 1 de referencia, se observa que la curva a los 251.42 °C, tiene un calor específico de fusión de 6.483 J/g. En el gráfico 2-3 correspondiente a la muestra 2, a 387.63°C hay un valor de calor específico de fusión de 684.2J/g y con una temperatura de fusión a 418.40°C. En el gráfico 3-3, la primera señal se dio a 77.77 °C que podría corresponder a la fusión de agua absorbida por el material, por otro lado, se observó la temperatura de degradación a 391.74°C y a 413,78°C la muestra presenta su temperatura de fusión.

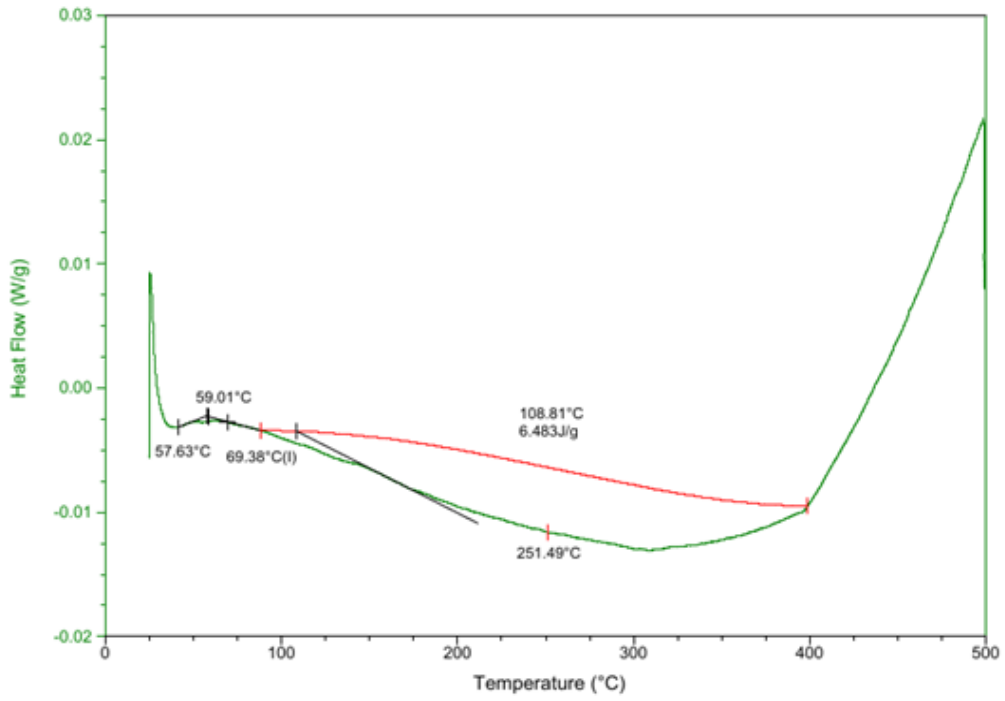


Gráfico 1- 3. Termograma DSC para la muestra 1 de referencia.
 Realizado por: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

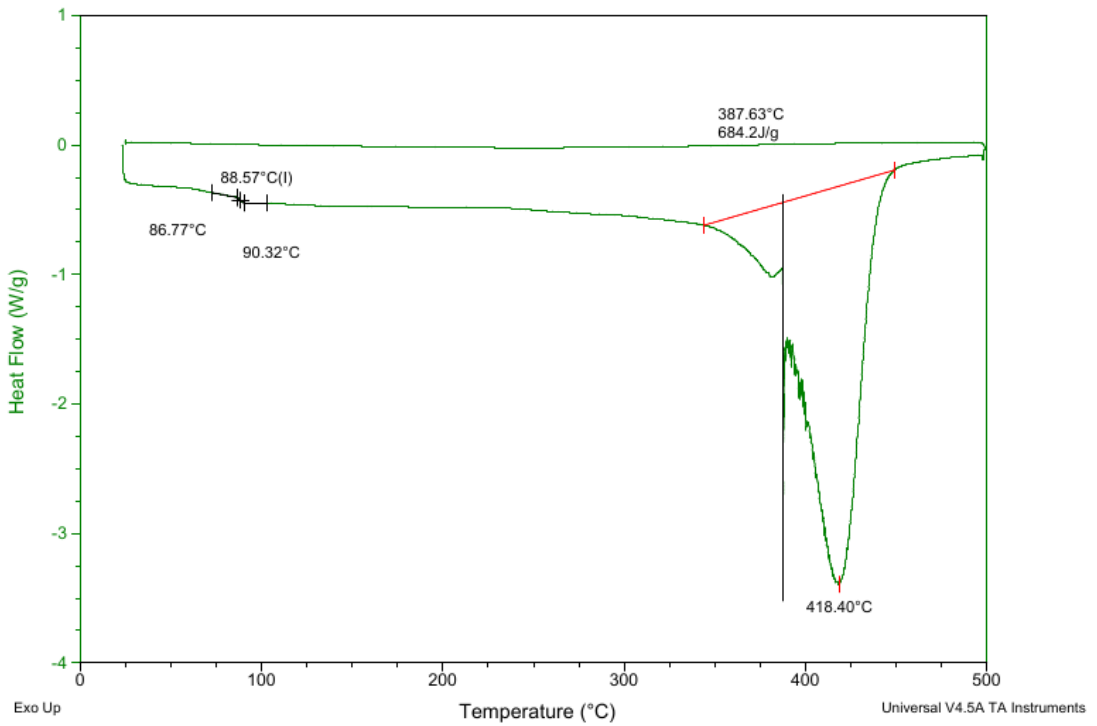


Gráfico 2- 3. Termograma DSC para la muestra2 de referencia
 Realizado por: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

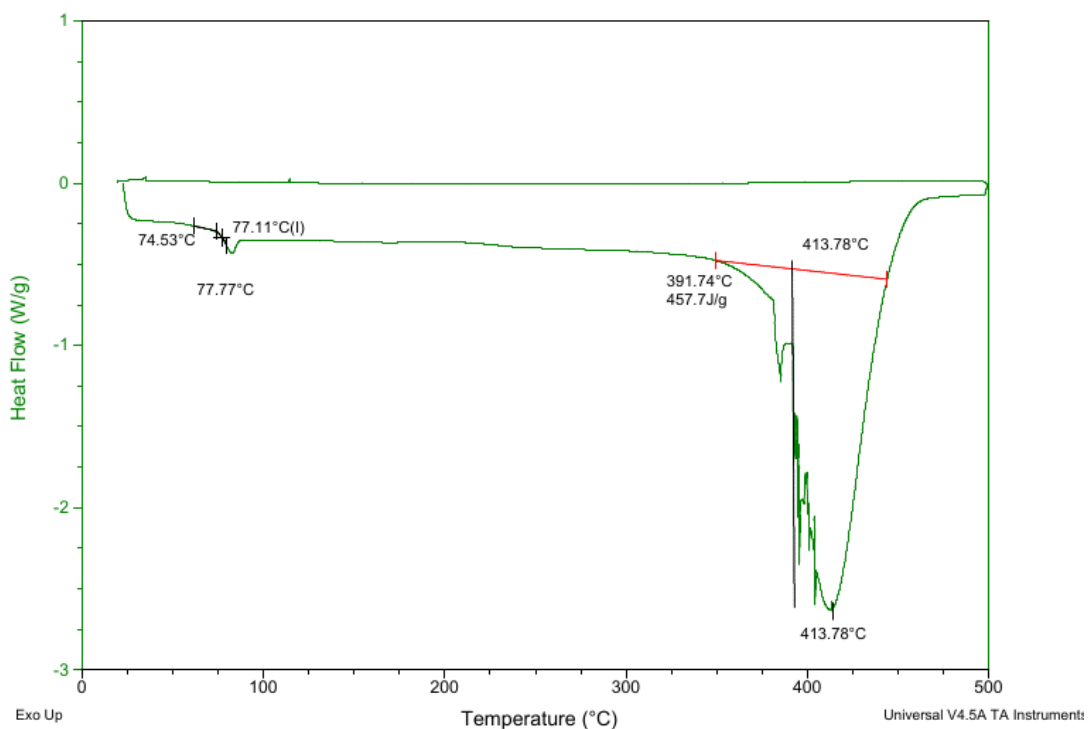


Gráfico 3-3. Termograma DSC para la muestra3 de referencia.
 Realizado por: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

3.1.3 Análisis Termogravimétrico TGA

El gráfico 4-3, indica que la muestra presenta una masa inicial de 26,8620 mg, la pérdida total de la muestra es del 99.72% quedando un residuo de aproximadamente 0.28% de la masa, pero también se pueden identificar cambios de masa que están directamente relacionados con el cambio de pendiente de la curva, la primera pérdida se observa cercano a los 100°C, está relacionada esta pérdida generalmente a la pérdida de agua, el primer residuo es de 99.88%, la segunda pérdida ocurre cercano a los 300°C hasta casi los 400°C dando un residuo del 90.67%, la última pérdida se observa entre los 400°C y los 450°C dando un residuo de 2.266%, sin embargo la máxima descomposición en esta muestra ha ocurrido a los 420.72°C.

Sample: Plastico cintillante verde-2
Size: 26.8620 mg
Method: Ramp

TGA

File: C:\...\Plastico cintillante verde-2.001
Operator: OC
Run Date: 08-Nov-2016 10:35
Instrument: TGA Q500 V20.10 Build 36

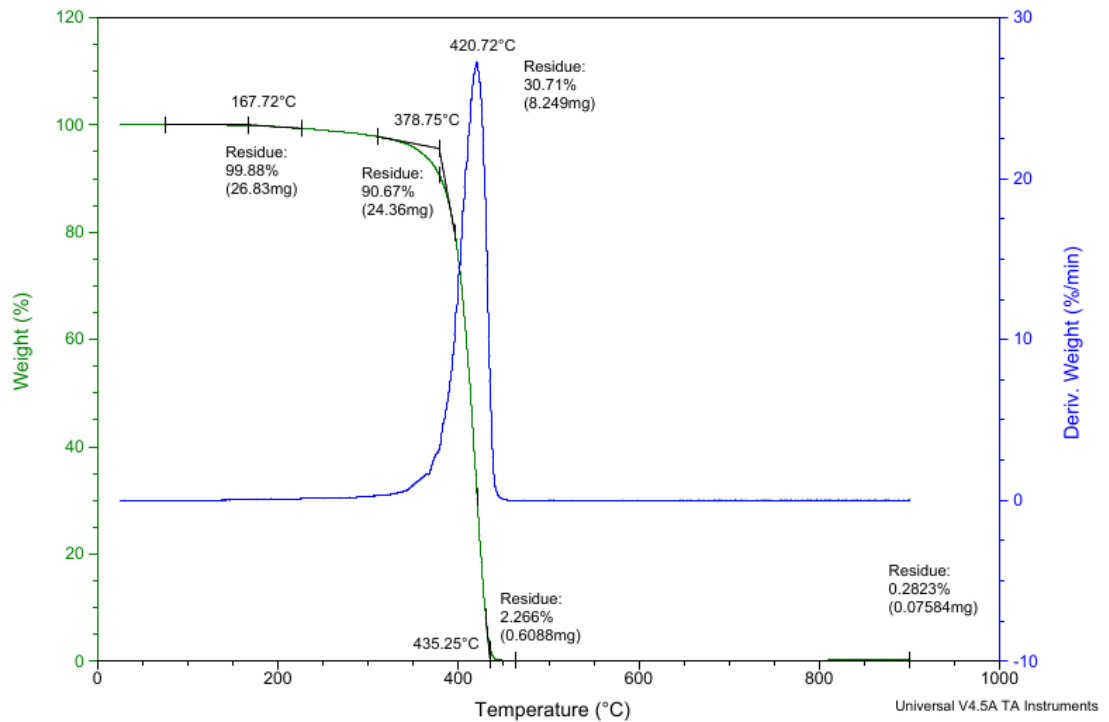


Gráfico 4- 3. Termograma TGA para la muestra 1

Realizado por: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

En el gráfico5-3, se indica que la muestra 2 tiene una masa inicial de 35,3660 mg, la pérdida total de la muestra es del 99.97% quedando un residuo de aproximadamente 0.021% de la masa, los cambios de masa identificados durante todo el proceso de degradación están asociados con el cambio de pendiente de la curva, la primera pérdida se observa cercano a los 340.43°C, hasta los 385.14°C, que está relacionada a la pérdida de agua, el residuo es de 24.93%, otra pérdida ocurre entre los 428.10°C hasta casi los 433.91°C dando un residuo del 9.980%, la máxima descomposición en esta muestra ha ocurrido a los 418.58°C.

Sample: Plástico 2_Verde-1
Size: 35.3660 mg
Method: Ramp

TGA

File: C:\...\Plástico 2_Verde-1.001
Operator: OC
Run Date: 27-Sep-2016 09:22
Instrument: TGA Q500 V20.10 Build 36

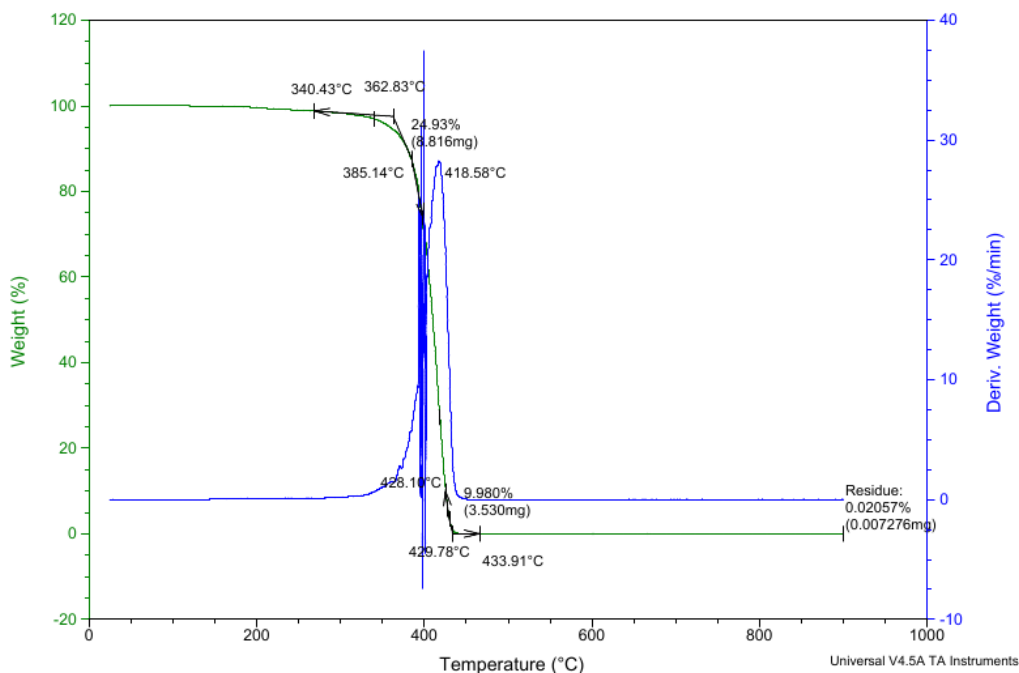


Gráfico 5- 3. Termograma TGA para la muestra2.

Realizado por: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

En el gráfico 6-3 la masa inicial para la muestra 3 de referencia fue de 18.4780mg, el residuo total de toda la muestra durante el ensayo fue de 0.3138%, se identifican en la figura los otros cambios de masa existentes, empezando cerca de los 100°C ocurre seguramente pérdida de agua quedando un residuo del 99.83%, la segunda pérdida considerable se da entre los 300°C hasta los 400°C, la pérdida de masa acumulada muestra que hay un residuo del 90.30%, la última pérdida de masa se da entre los 400°C y 450°C, en este caso queda de residuo un 3.360% del total de la masa de la muestra inicial, sin embargo la temperatura a la cual ocurre la máxima descomposición está dada a los 407.94°C.

Sample: Plástico 1_blanco-2
 Size: 18.4780 mg
 Method: Ramp

TGA

File: C:\...Plástico 1_Blanco-2.001
 Operator: OC
 Run Date: 26-Sep-2016 10:16
 Instrument: TGA Q500 V20.10 Build 36

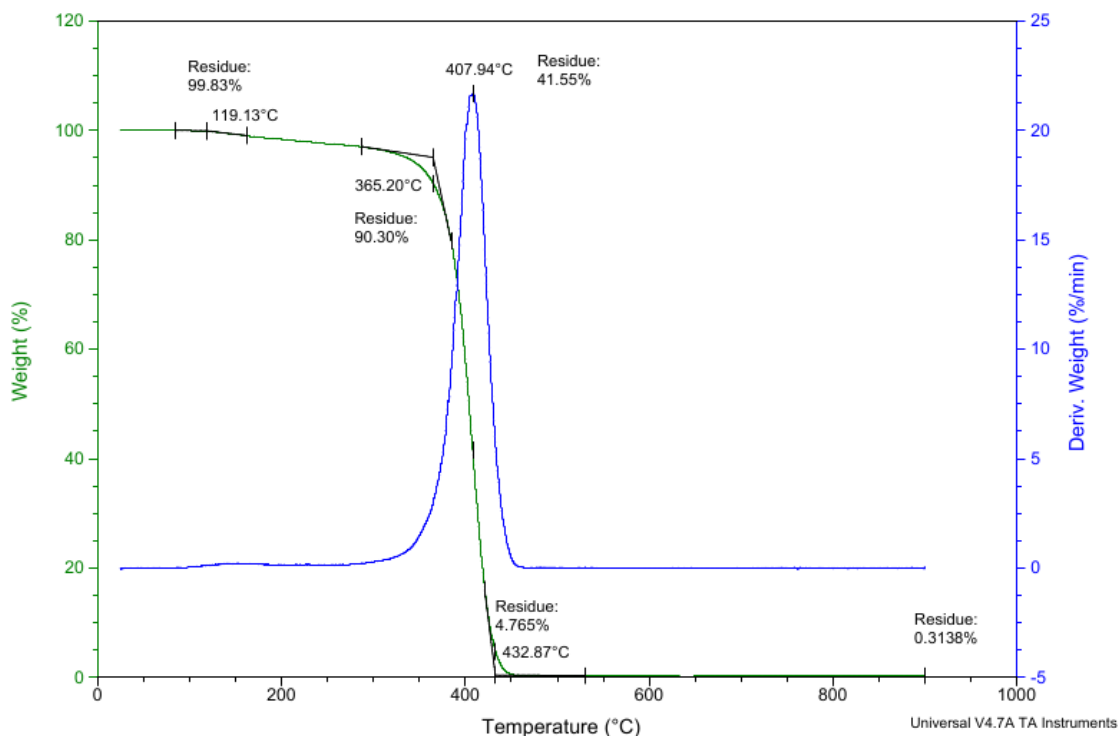


Gráfico 6- 3. Termograma TGA para la muestra3

Realizado por: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

Los tres gráficos indican las distintas temperaturas en las cuales existen pérdidas de masa expresadas en porcentaje, sin embargo, los gráficos 4-3, 5-3, indican aparte del porcentaje de pérdida de masa el mismo valor, pero expresado en miligramos. La tabla 2-3, muestra los rangos de las temperaturas a la cual ocurre los tres procesos de descomposición de los plásticos centellantes de referencia.

Tabla 2- 3. Rangos de descomposición de los plásticos centellantes de referencia

Muestra	Zona 1 Pérdida de humedad (°C)	Zona 2 Degradación Térmica (°C)	Zona 3 Degradación total del polímero (°C)
1	167.72- 378.75	378.75- 400	400-435.25
2	340.43- 385.14	385.14-428.10	428.20-433.91
3	119.13- 365.20	365.20- 400	400-432.87

Realizado por: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

3.1.4 Análisis Termomecánico(TMA)

El gráfico 7-3. Muestra una curva descendente con valores en los cuales la muestra 1 de referencia se deforma en función de la temperatura. El tamaño de la muestra inicial fue de 1.9333mm. Entre 25.43- 90 °C la muestra se estiró a un valor de $143.3 \frac{\mu m}{(m \cdot ^\circ C)}$, en la gráfica presenta un valor constante, pero a partir de los 112.11-163.35°C la muestra disminuyó a un valor de $1372 \frac{\mu m}{(m \cdot ^\circ C)}$, la última disminución de su tamaño fue entre los 195.46-228.23°C, a un valor de $6867 \frac{\mu m}{(m \cdot ^\circ C)}$.

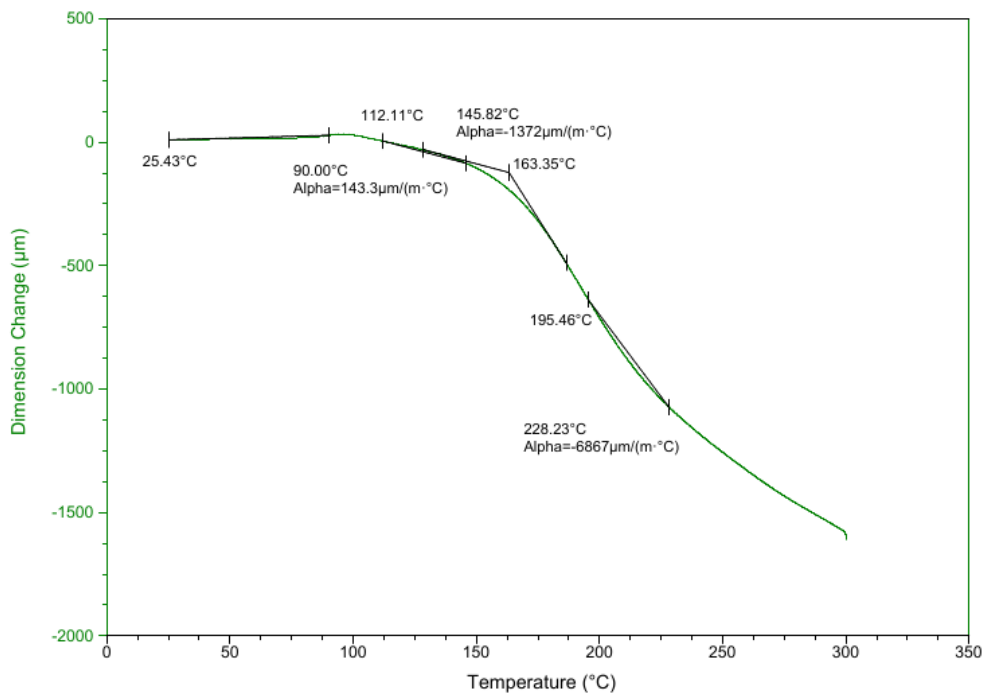


Gráfico 7- 3. Termograma TMA de la muestra 1 de referencia
Realizado por: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

En el gráfico 8-3, se observa una curva muy similar a la anterior pero en este caso la curva aumenta en un valor de $50 \mu m$ entre los $25.43^{\circ}C$ hasta los $90^{\circ}C$, en este momento aparece una deformación de aumento en el plástico de $105.9 \frac{\mu m}{(m \cdot ^\circ C)}$, pero a partir de esta temperatura ocurre un pequeño decaimiento de $-50 \mu m$, esto entre los $90^{\circ}C$ y $159.3^{\circ}C$ con un valor para $\alpha = -578.6 \frac{\mu m}{(m \cdot ^\circ C)}$, que es el valor correspondiente a la deformación, y a partir de los $159.3^{\circ}C$, la curva decae completamente hasta casi un valor de $-1005 \mu m$, la última deformación que sufre la muestra por lo tanto ocurre a los $190.28^{\circ}C$, con un valor para $\alpha = -15811 \frac{\mu m}{(m \cdot ^\circ C)}$.

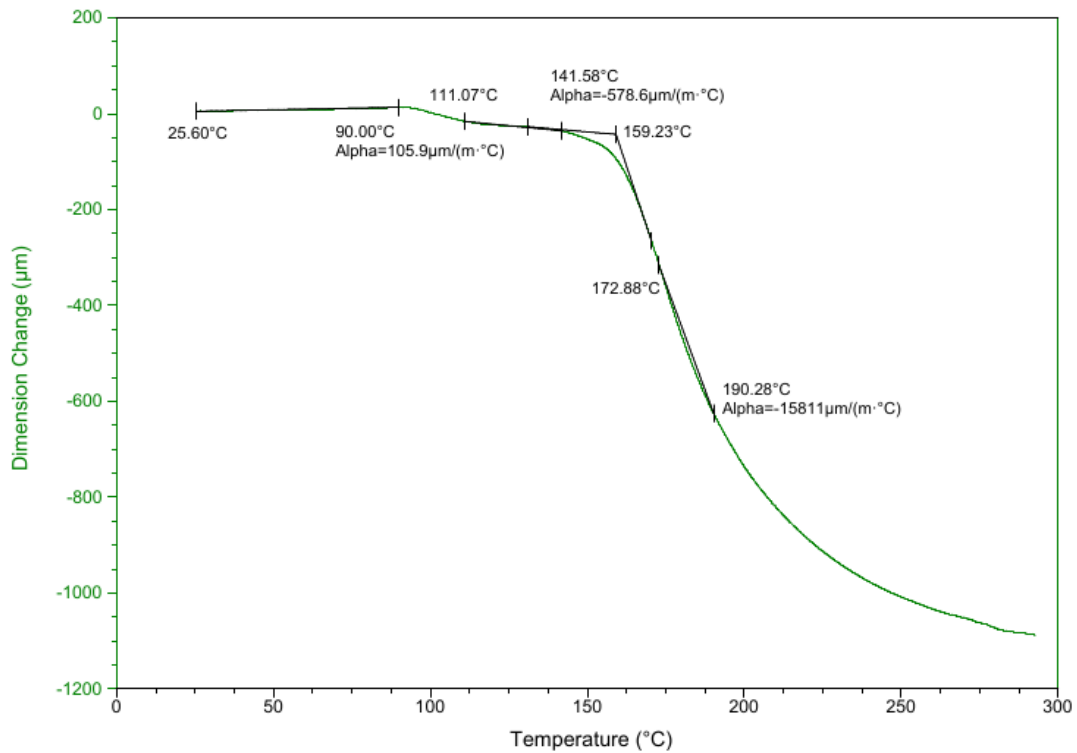


Gráfico 8- 3. Termograma TMA de la muestra 2 de referencia
 Realizado por: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

Para la tercera muestra se observa en el gráfico 9-3, se observa que también ocurre una primera deformación de aumento en un valor de $50 \mu m$ entre los $25.43^{\circ}C$ hasta los $90^{\circ}C$, en este momento aparece una deformación de aumento en el plástico de $97.16 \frac{\mu m}{(m * ^{\circ}C)}$, pero a partir de los $90^{\circ}C$, la curva empieza a decaer ocurriendo una segunda deformación pero de reducción de $-125 \mu m$ por lo que a los $168.5^{\circ}C$ el valor para $\alpha = -865.4 \frac{\mu m}{(m * ^{\circ}C)}$, el decaimiento de la curva se mantiene hasta llegar a los $-1375 \mu m$, sin embargo la última deformación se da a los $252.9^{\circ}C$ con un valor para $\alpha = -7131 \frac{\mu m}{(m * ^{\circ}C)}$.

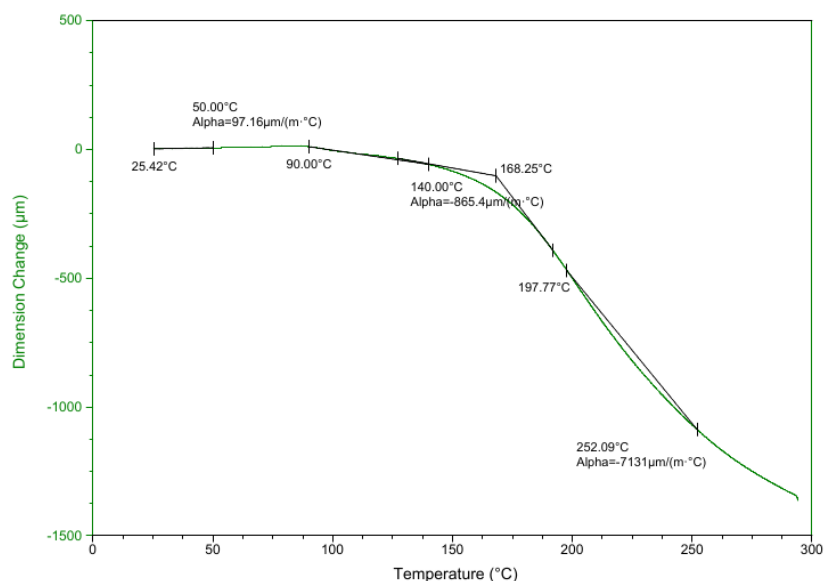


Gráfico 9- 3. Termograma TMA de la muestra 3 de referencia
Realizado por: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

3.1.5 Espectrometría Infrarroja por transformada de fourier (FTIR)

El espectro para la muestra 1 de referencia se observa en el gráfico10-3, en la cual se muestra bandas intensas en: 782.958 y 704.855 cm^{-1} , hay la presencia de grupos aromáticos, grupos vinilos en 819.598 cm^{-1} , en 1033.66 cm^{-1} hay aminas alifáticas, mientras que cerca de 1444.42 cm^{-1} , también hay la presencia de un grupo aromático $\text{C}=\text{C}$, se muestra un pico con menos intensidad a los 2341.16 cm^{-1} en donde encontramos al grupo vinilo. Pero también hay otras bandas con picos representativos en: 2919.6 , 2846.42 cm^{-1} , con la presencia de iones de amonio. Por lo tanto en los picos más intensos hay la probabilidad de encontrar CH_3 – y CH_2 – en componentes alifáticos, así como también 1, 2,3 Bencenos trisustituidos.

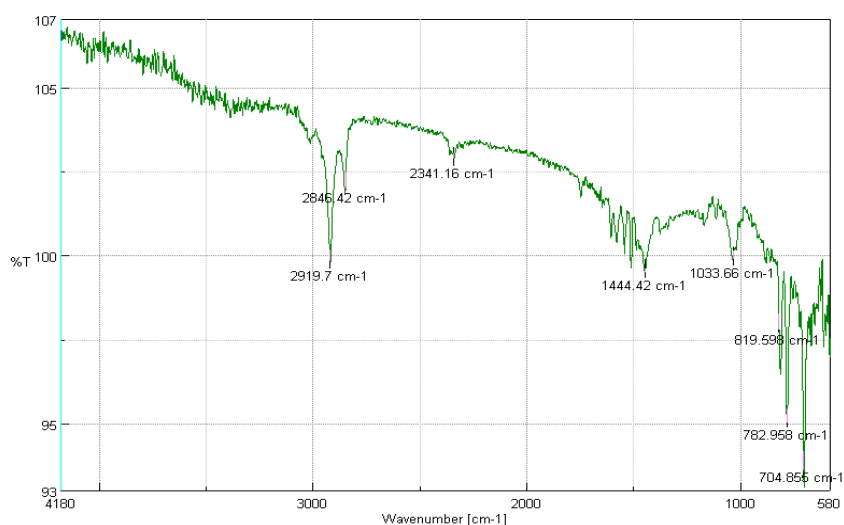


Gráfico 10-3. Prueba de FTIR para la muestra 1 de referencia
Realizado por: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

El gráfico 11-3, corresponde al espectro para la muestra 2 de referencia, en este caso se ha obtenido un espectro con un pico profundo a 689.427 cm^{-1} , correspondiente a la presencia de grupos aromáticos, en 746.317 cm^{-1} hay un grupo alquino, sin embargo, aparecen también otros picos más cortos pero representativos a 1444.42 cm^{-1} , existe la presencia de grupos aromáticos C=C; en 2361.41 hay un grupo vinilo y los iones de amonio presentes en 2851.24 y 2913.92 cm^{-1} .

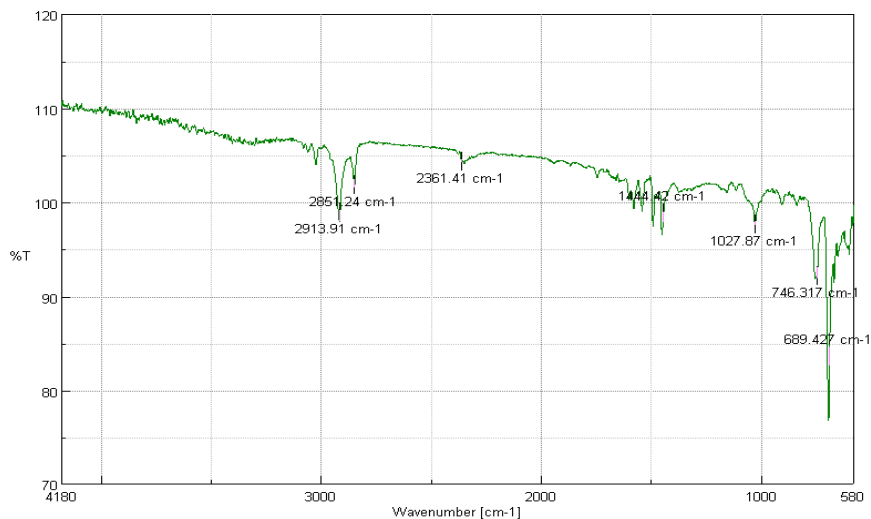


Gráfico 11-3. Prueba de FTIR para la muestra 2 de referencia
Realizado por: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

El análisis para la muestra 3 de referencia se puede observar en el gráfico 12-3, este espectro muestra 3 bandas intensas a 2924.52 , 778.136 y 694.248 cm^{-1} , existiendo la presencia de iones de amonio y grupos aromáticos, este caso la transmitancia parte de un máximo del 111% que empieza a descender hasta casi aproximadamente 100%, la menor transmitancia se observa en un pico no tan ancho aproximadamente a los 778.136 cm^{-1} . Los picos en: 1033.66 cm^{-1} , muestra la presencia de aminas alifáticas, en 2345.99 cm^{-1} un grupo vinilo y 2924.52 cm^{-1} , con la presencia de iones de amonio.

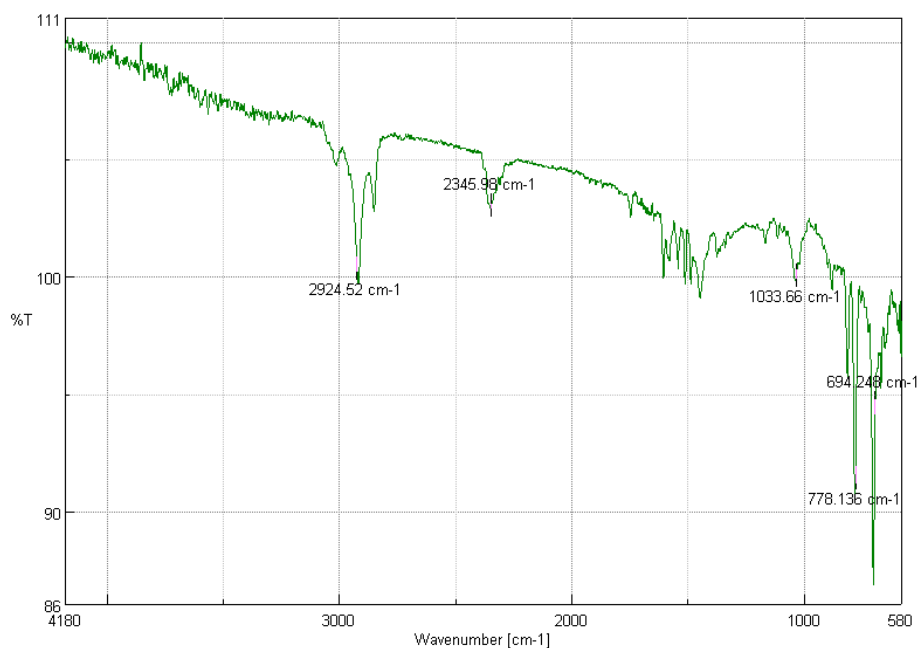


Gráfico 12-3. Prueba de FTIR para la muestra 3 de referencia

Realizado por: Caterine Carrasco; Kelmly Díaz. 2017

Prototipos

Muestra 1

El gráfico 13-3 muestra bandas con picos cortos y profundos, los picos en 652.78, 688.21, 694.24 y 741.49 cm^{-1} , muestra la presencia de grupos alcanos, en 842.74 cm^{-1} , hay grupos aromáticos específicamente benceno parasustituido. En 910.23 cm^{-1} , existe la presencia de un grupo vinilo mientras que cerca de 962.31 cm^{-1} hay grupos aromáticos, en los picos 1064.51, 1121.4 cm^{-1} existe aminas alifáticas. Se observa un pico ancho a los 1257.36 cm^{-1} con la presencia de grupos aromáticos y vinílicos. A los 1452.14, 1491.67, 1603.52 cm^{-1} , se halla la presencia de grupos aromáticos C=C. los picos más profundos se encuentran en: 1725.98 cm^{-1} , en este punto hay la presencia de Cetonas y a 2361.41 cm^{-1} hay grupos vinilos.

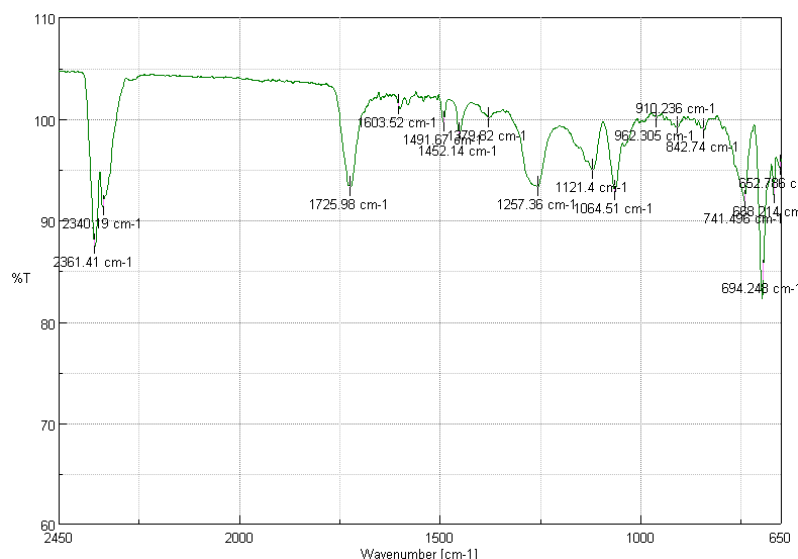


Gráfico 13- 3. Espectro FTIR para el prototipo 1
 Realizado por: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

Muestra 2

Para el espectro del prototipo 2, los picos del gráfico 14-3, muestran bandas con picos intensos y cortos. Un pico en 673.03cm^{-1} hay un grupo vinilo precisamente alqueno cis-disustituido y un enlace fuerte, en 741.49cm^{-1} hay un grupo aromático específicamente benceno orto-sustituido los enlaces son fuertes en este pico, Mientras que en 1121.4cm^{-1} y 1259.29cm^{-1} hay éteres (alifáticos, cíclicos, aromáticos y vinílicos), un pico corto en 1384.64cm^{-1} con la presencia de fenoles, en 1543.74cm^{-1} también se observa picos muy cortos existiendo grupos aromáticos $\text{C}=\text{C}$. Los picos más intensos se observan a partir de 1718.26cm^{-1} en donde hay cetonas, en 2343.09cm^{-1} y 2358.52cm^{-1} hay grupos de fenoles.

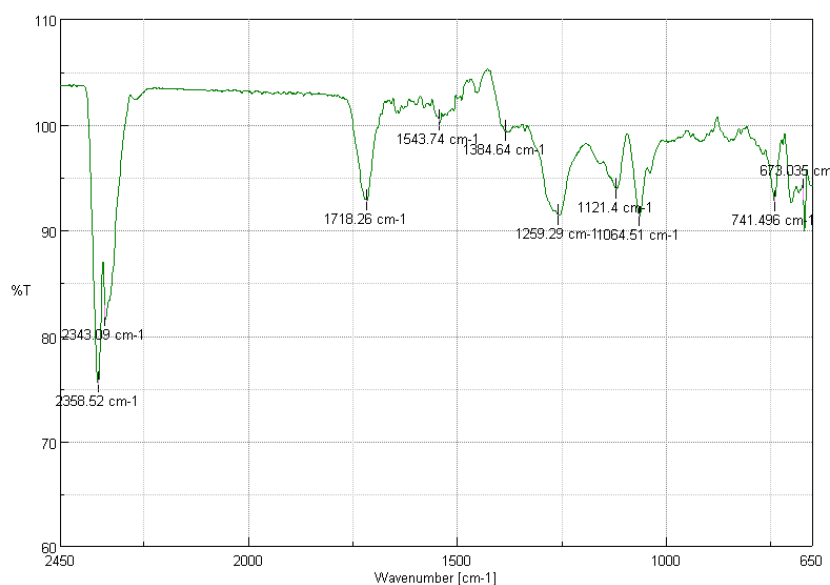


Gráfico 14-3. Espectro FTIR para el prototipo 2
 Realizado por: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

Muestra 3

El gráfico 15-3, muestra bandas con picos intensos en 2358.52 y 2340.19 cm^{-1} aquí hay la presencia de fenoles, en 1723.09 cm^{-1} hay adhéidos como consecuencia de la influencia de la conjugación como ocurre en las cetonas ($\text{C}=\text{O}$), posiblemente a los 1265.07 cm^{-1} existe éteres precisamente grupos aromáticos y vinílicos, enlace $\text{C}-\text{O}$, hay otros picos representativos en 1064.51 cm^{-1} existe ésteres ($\text{C}-\text{O}$), a los 743.424 cm^{-1} encontramos un grupo aromático de benceno monosustituido con la presencia de enlace fuerte. Los picos más pequeños se encuentran en 1384.64 con la existencia de fenoles y en 1455.03 cm^{-1} , existe grupos aromáticos $\text{C}=\text{C}$. Estos dos últimos picos muy cortos por lo tanto muy poco representativos.

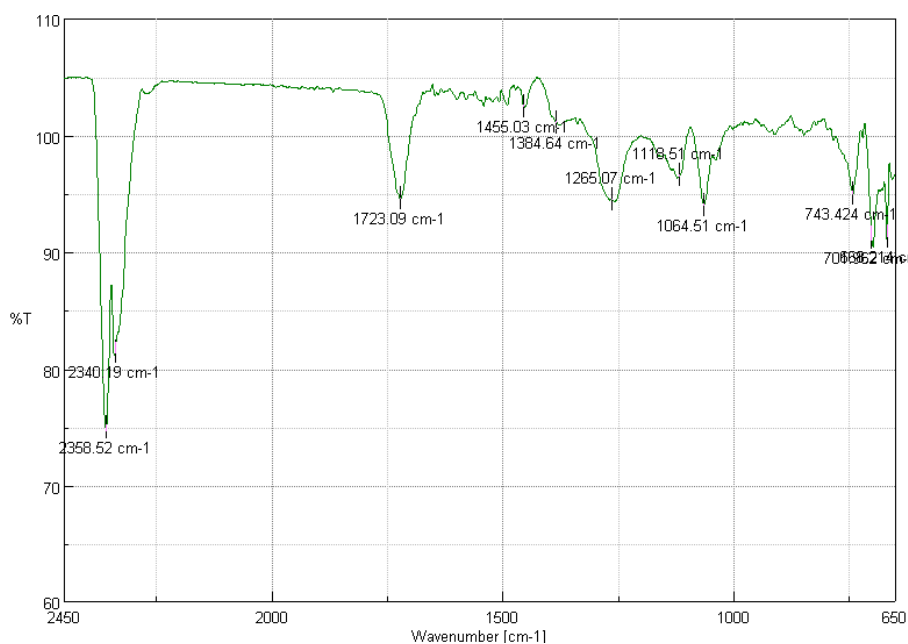


Gráfico 15- 3. Espectro FTIR para el prototipo 3
Realizado por: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

Muestra 4

El espectro del gráfico 16-3 muestra un espectro con bandas intensas y una transmitancia a partir del 100% descendiendo el espectro hasta una transmitancia de 70%, sin embargo la mayor transmitancia ocurre entre los 40% y 100%, habiendo bandas con picos de 1725.98 , 1252.54 y 1064.51 cm^{-1} , dentro de estas bandas se encuentran grupos de ácido carboxílico, ésteres (aromáticos y vinílicos) y ésteres ($\text{C}=\text{O}$, $\text{C}-\text{O}$). Dos bandas no tan intensas en: 2924.51 y 2351.77 cm^{-1} existe la posibilidad de encontrar grupos ácidos carboxílicos y fenoles respectivamente ($\text{O}-\text{H}$). A su vez hay picos cortos cerca de los 1600 cm^{-1} . Encontrando grupos aromáticos $\text{C}=\text{C}$.

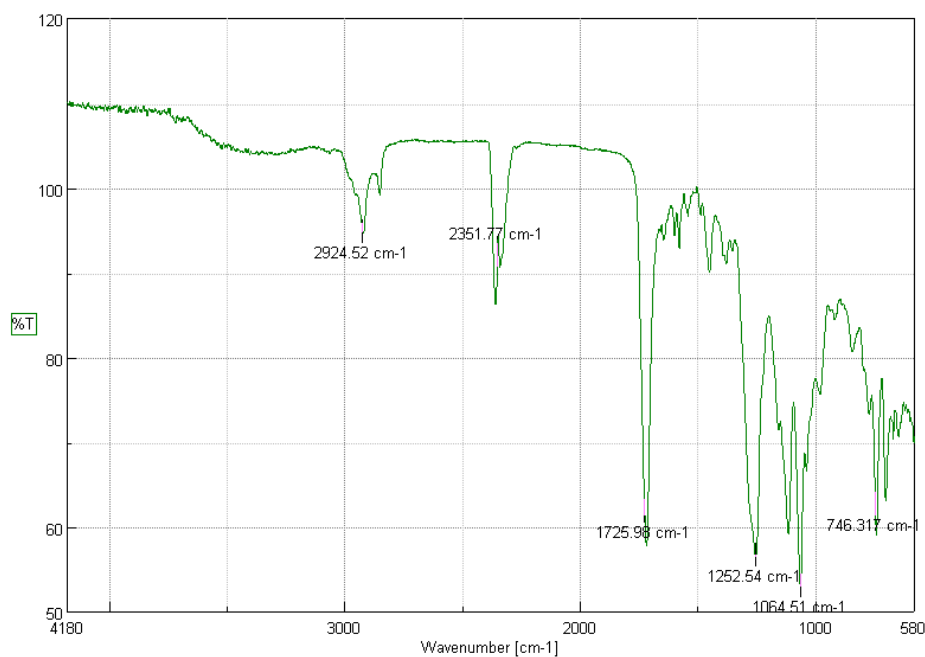


Gráfico 16-3. Espectro FT-IR del prototipo 4

Realizado por: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

Muestra 5

En el gráfico 17-3, se observan picos intensos en 2361.41 y 2337.3 cm⁻¹, existe en estos picos la probabilidad de encontrar fenoles, se observa un pico pequeño de 1543.74 cm⁻¹ cercano a los 1600 cm⁻¹, que posiblemente indica la presencia de un anillo aromático C=C. otros picos menos intensos también en 1258.32, 1063.55 cm⁻¹ que hay ésteres (aromáticos y vinílicos), 701.962 cm⁻¹, en donde encontramos la presencia de un grupos aromático.

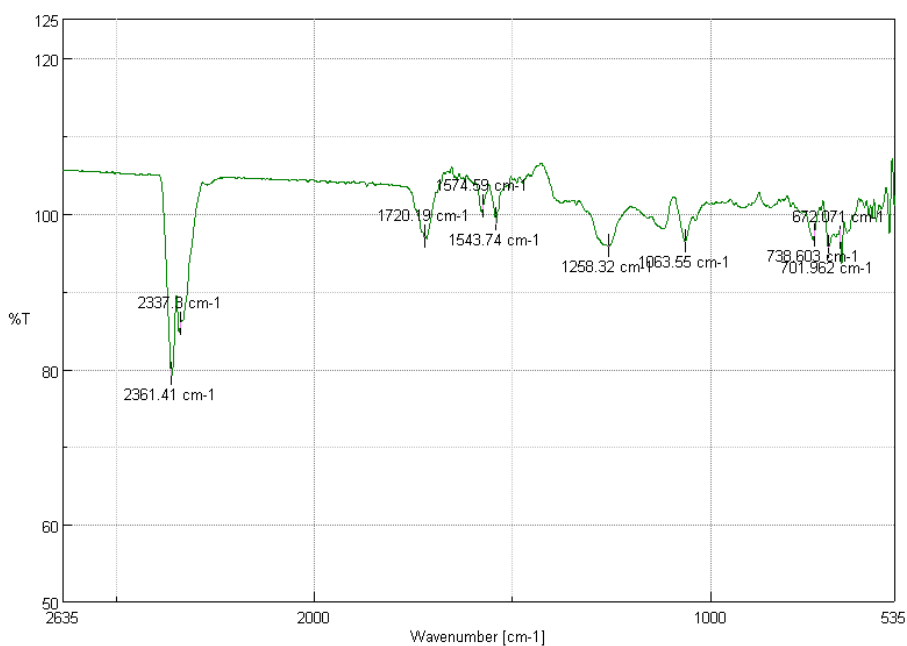


Gráfico 17- 3. Análisis de FTIR para el prototipo 5

Realizado por: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

Análisis de cada uno de los materiales utilizados para la construcción de prototipos

Análisis FTIR del Estireno

El gráfico 18-3 se observan las bandas correspondientes al espectro del estireno, en donde las bandas más representativas se encuentran en 694cm^{-1} , 778cm^{-1} y 903cm^{-1} , estas tres bandas están constituidas por alhéidos debido al doblamiento de C-C-CHO, 1,2,3 benzenos trisustituidos debido a la deformación de CH fuera del plano. Así mismo se encuentra otras bandas en 1491cm^{-1} y 1627cm^{-1} , que muestran la presencia de C=O en β -dicetonas debido al estiramiento de C=O. Sin embargo, hay tres picos entre los 3000cm^{-1} y 3085cm^{-1} debido al estiramiento de =C-H en hidrocarburos insaturados y grupos aromáticos.

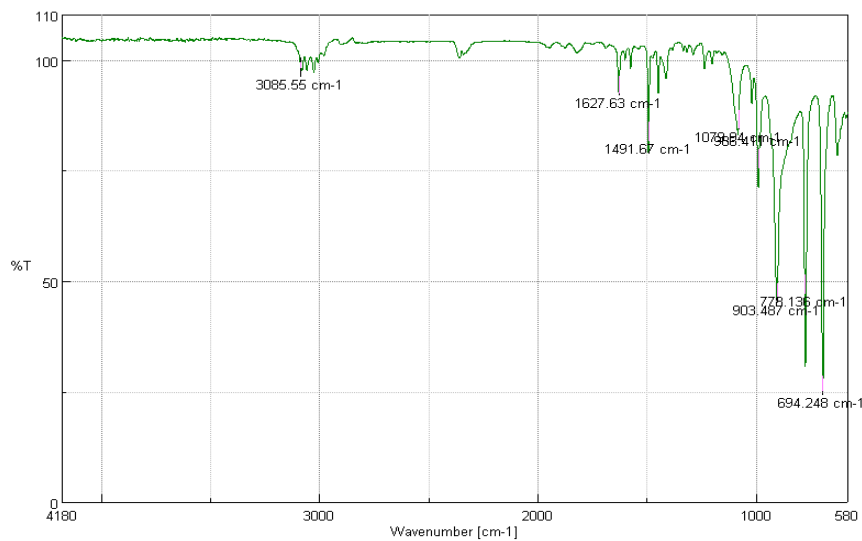


Gráfico 18-3. Espectro FTIR del estireno

Realizado por: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

Análisis FTIR de Metil Etil Cetona (Mek)

El gráfico 19-3 muestra el espectro para el metil etil cetona más conocida como (Mek), se puede observar una banda intensa a 1710cm^{-1} con la presencia de una tensión C=O, mientras que entre 1100cm^{-1} y 1300cm^{-1} hay una flexión de C-CO-C, el sobretono de tensión C=O se da a los 3414cm^{-1} . Otros picos se observan a los 2976cm^{-1} y 2361cm^{-1} hay la presencia de CH debido al estiramiento simétrico y antisimétrico.

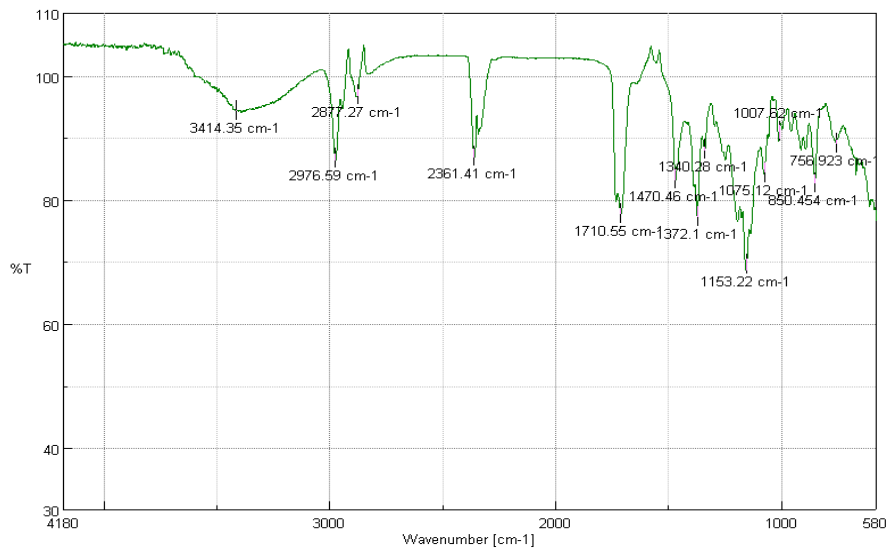


Gráfico 19-3. Espectro FTIR para el material que actúa como secante Mek
Realizado por: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

Análisis FTIR de la Resina

La caracterización química del material resina epóxico mediante espectroscopia infrarroja se representa en el gráfico 20-3, en la cual se observa la presencia del grupo funcional éter (C-O-C) por la absorción fuerte localizada entre 1150cm⁻¹ y 1070 cm⁻¹ dada por el estiramiento asimétrico. La banda en 1257cm⁻¹ se debe al estiramiento de C-O. Mientras que las bandas e 1721cm⁻¹, 1496cm⁻¹ y 1450cm⁻¹ se deben al estiramiento de C=O en aldehídos y el estiramiento el anillo de benceno en los compuestos aromáticos. También los enlaces C-H de carbonos alifáticos generan la absorción en la banda 632cm⁻¹, debido a la deformación del anillo en el plano.

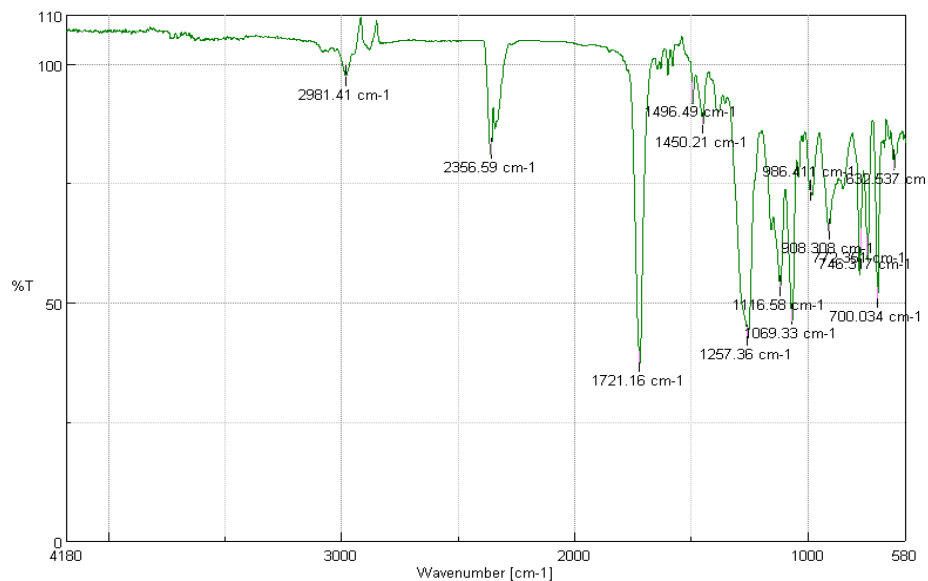


Gráfico 20-3. Espectro FTIR de la resina epoxi
Realizado por: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

Análisis FTIR del Octoato de Cobalto

El gráfico 21-3, se observan los picos representativos correspondientes al octoato de cobalto, en 1715cm^{-1} se da el estiramiento de $\text{C}=\text{O}$ en cetonas, mientras que entre en $1000\text{-}1100\text{cm}^{-1}$ se observa un estiramiento antisimétrico de Si-O-Si en silanos, a los 1257cm^{-1} hay estiramiento de C-O .

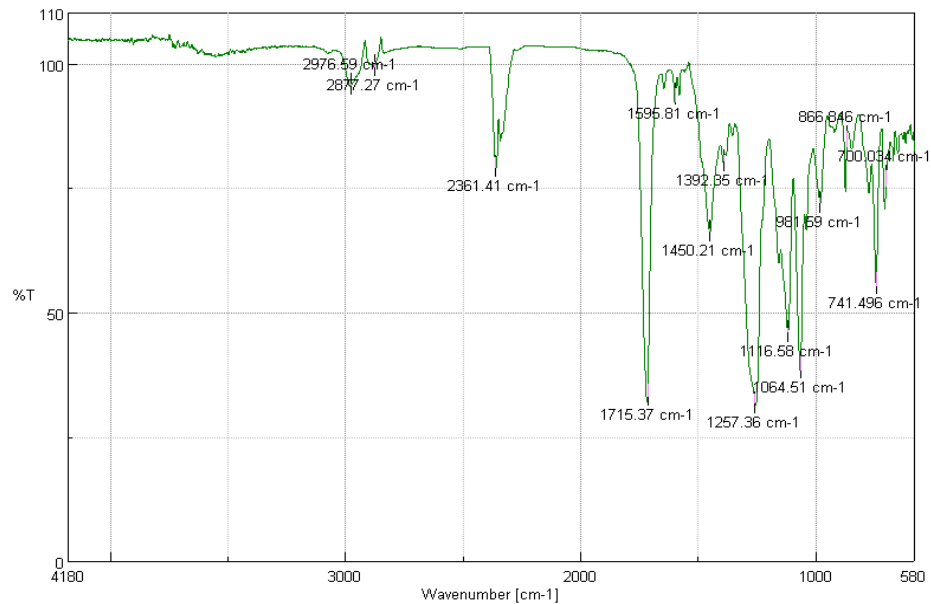
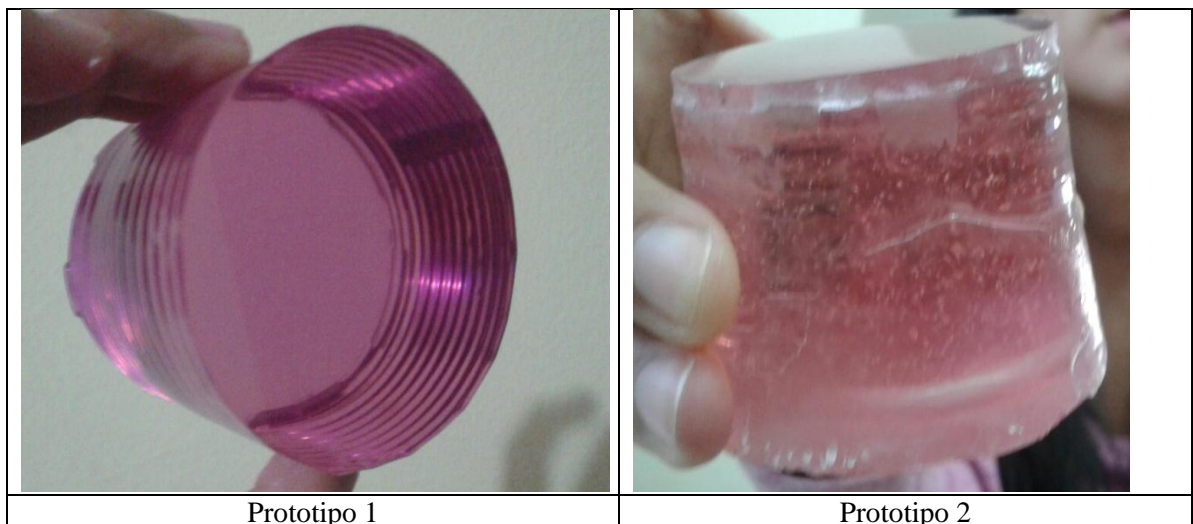


Gráfico 21-3. Espectro FTIR del Octoato de Cobalto

Realizado por: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

3.2 Diseño experimental del prototipo



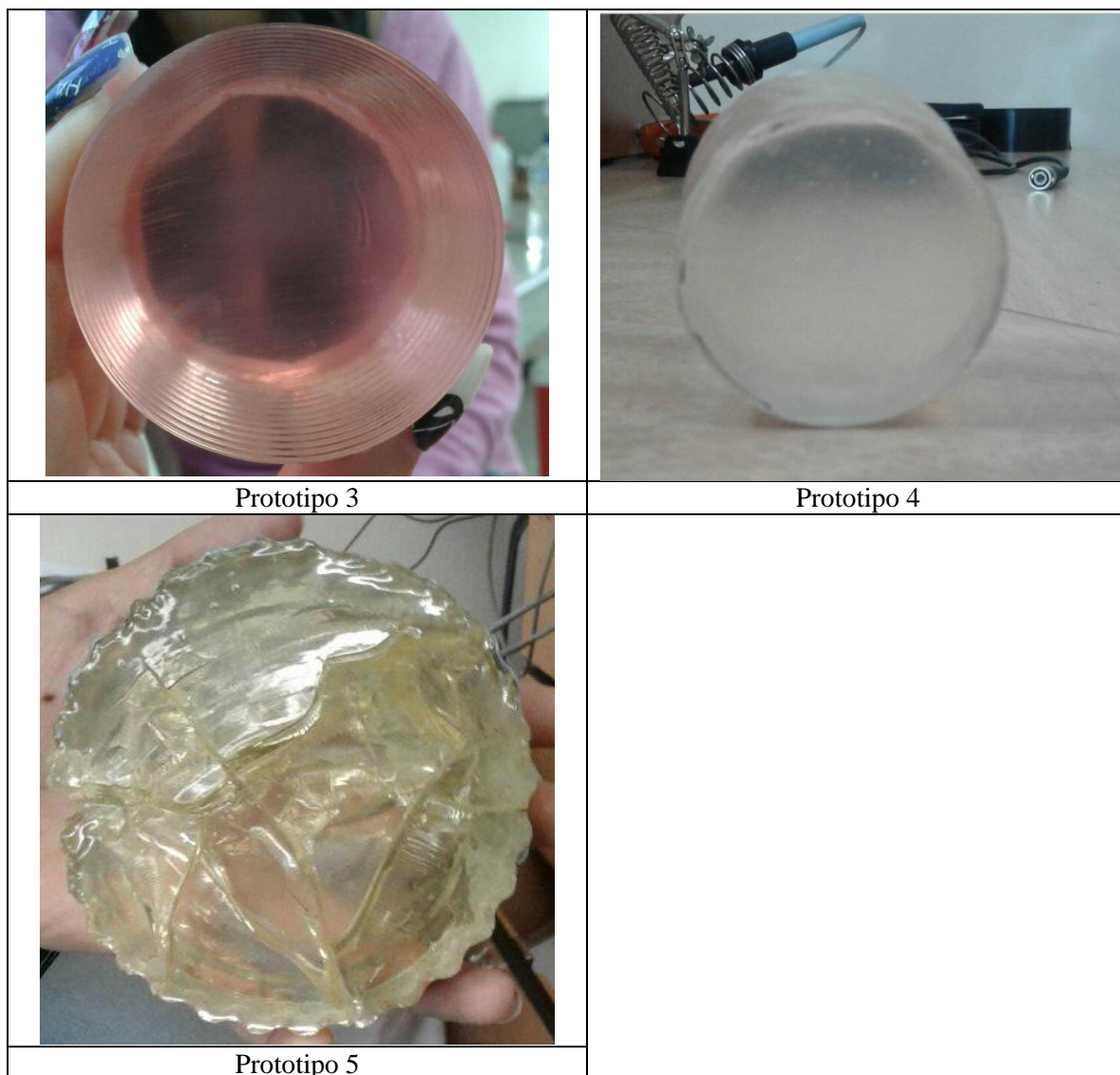


Figura 1- 3. Prototipos de centelladores plásticos obtenidos,

- a) Muestra un color violeta debido a la cantidad de Octoato de cobalto utilizado sin porosidad, b) tiene un aspecto en su parte interior porosa, c) el plástico ha obtenido un color anaranjado sin porosidad, d) Casi incoloro sin porosidad, e) Color amarillento-verdoso su solidez ocasionó que se cuarteara completamente.

Fuente: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

Tabla 3-3. Resultados de los prototipos de plásticos centellantes, aspectos físicos.

	Color	Aspecto	Estado
Prototipo 1	Violeta	Transparente	Sólido
Prototipo 2	Anaranjado	Transparente	Sólido poroso
Prototipo 3	Anaranjado	Transparente	Sólido
Prototipo 4	Amarillo	Transparente	Sólido
Prototipo 5	Amarillo	Transparente	Sólido cuarteado

Realizado por: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

La figura 1-3, muestra los prototipos de los centelladores que se obtuvieron, hay cinco casos: a,b,c,d y e. Todas las muestras mostraron solidez después que pasaron por su proceso de secado,

sin embargo la muestra b), mostró porosidad en un parte interna. La muestra e), en cambio se cuarteó completamente una vez que logró secarse completamente, pero no logrando cristalizarse uniformemente.

En la tabla 3-3. Se describen los aspectos físicos de los prototipos realizados, todos los prototipos adquirieron un aspecto sólido, sin embargo, dos de los prototipos no sirvieron para realizar las pruebas comprobación de funcionamiento.

3.3 Funcionamiento de los prototipos

Solamente se pudo realizar la verificación de funcionalidad de las cuatro muestras prototipos, debido a que la quinta muestra, es sólida, pero por su aspecto cuarteado no tiene las condiciones adecuadas para ser puesta en funcionamiento.

Para las cuatro muestras los resultados obtenidos se observan como se muestra en el gráfico22-3, en la cual la señal que se observa de color verde es la de la muestra de control, mientras que la señal debió haberse producido en la línea de color amarillo, no existiendo ninguna señal encontrada por lo tanto no existe detección de partículas de alta energía. Lo que equivale a decir, que ninguna de las muestras-prototipo tiene un resultado favorable.

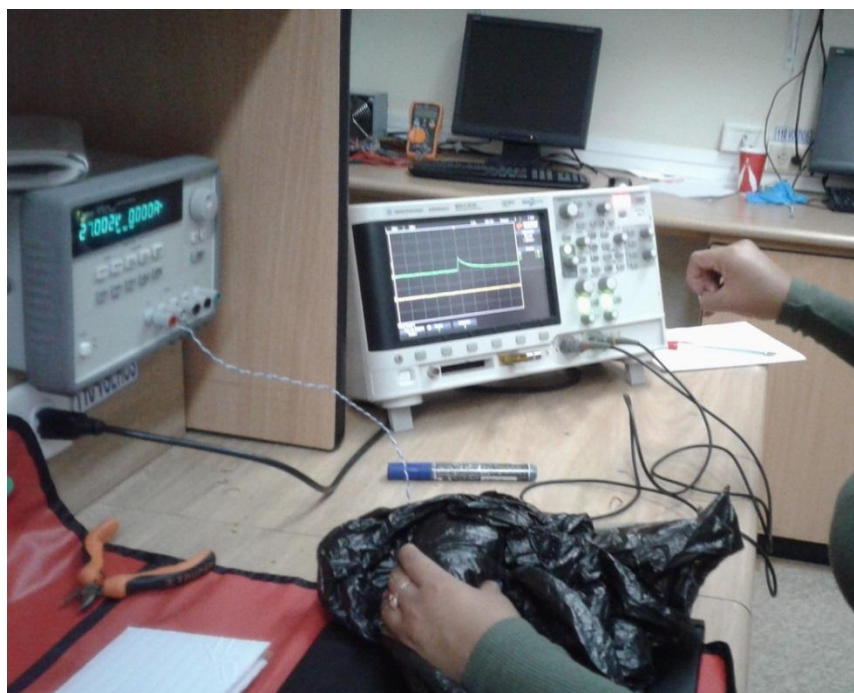


Gráfico 22-3. Resultado del funcionamiento de las muestras-prototipos.
Realizado por: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

EN CUANTO A LA HIPOSTESIS:

La demostración de la hipótesis (1.5.1), se hizo por prueba -error y mediante observación directa de las señales obtenidas en el osciloscopio.

En el presente trabajo se utilizó materiales de bajo costo: estireno, resina, mek y octoato de cobalto para construir un plástico que como resultado final diera un plástico centellante. Al utilizar resina, estireno y mek. Se demostró que si se puede construir un plástico. La figura 1-3 prototipo 4. Presenta ser el plástico más parecido en cuando a aspecto físico a un centellador comercial por lo que concuerda con la investigación de Cheol Ho Lee et al (2016) en donde indica que se puede utilizar estireno como material base y principal para construir plásticos centellantes y un peróxido que actué como secante.

Los resultados obtenidos en el gráfico 22-3, muestran que la investigación experimental con los materiales utilizados, no es válida, debido a que no permite la comprobación de la hipótesis propuesta, por ende, no es posible construir un plástico centellante, utilizando solamente materiales de bajo costo sin incluir, sustancias que actúen como centellantes y sean los responsables de caracterizar los plásticos. Sustancias que solamente se las pueden conseguir importando a un precio elevado. Así, podemos observar que la señal (color amarillo) obtenida con el osciloscopio de nuestro prototipo, no presenta el pico que corresponde a la radiación detectada por el osciloscopio (color verde) en el plástico centellante comercial, por lo que al comparar estas dos señales nuestra hipótesis es rechazada por comparación con un estándar de la bibliografía revisada.

CONCLUSIONES

- Utilizar centelladores plásticos, permite obtener respuestas de un elevado número de partículas en un tiempo corto. Para detectar partículas de alta energía el uso de este tipo de detectores resulta ser lo más favorable.
- Actualmente dentro de la investigación en astrofísica fabricar centelladores plásticos ocupa un lugar primordial. La idea es lograr construir un centellador plástico con bajo costo pero con un 100% en cuanto al rendimiento de luz y transmitancia en comparación con centelladores plásticos comerciales. Sin embargo en el Ecuador no se han realizado estudios para fabricar centelladores de este tipo.
- Las tres primeras muestras (M1, M2 y M3) de los prototipos presentan una coloración rosada esto se debe a la presencia de octoato de cobalto, las dos últimas muestras no presentan esta coloración debido a que no se colocó esta sustancia. La condición de coloración ideal que se necesita es transparente, por tanto, es mejor no usar octoato de cobalto en la fabricación de las muestras de prototipos. Además, que esta sustancia al someter a la prueba del UV-Visible no permite el paso de la luz incidente.
- Se realizaron las mezclas de las 5 muestras de los prototipos con las siguientes unidades. M1: 50ml de estireno, 50ml de resina, 0.10ml de Octoato de cobalto y 0.4ml de Mek. En la M2 solo se utilizó, 50ml de resina, 0.20ml Octoato de cobalto y 0.4Mek. En la M3 solo se utilizó 50ml de estireno, 0.20ml de Octoato de cobalto y 0,8 ml de Mek. En la M4 se utilizó, 50ml de estireno, 55ml de resina y 4ml de Mek. Mientras que en la M5 no se utilizó Octoato de cobalto, hubo un aumento de los ml de las tres sustancias, 100ml de estireno, 110ml de resina y 8ml de Mek. En donde la muestra 5 no logró cristalizarse por completo debido a que las unidades de las sustancias agregadas fueron duplicadas, además el envase utilizado como base fue demasiado delgado para soportar el calor de la mezcla. La mejor muestra de acuerdo al color, aspecto y estado, es la M4, debido a que presentó un color muy semejante y un estado sólido en comparación a los centelladores de referencia.
- Con el análisis del FTIR realizado en las tres muestras de referencia (comerciales). Se obtuvieron los siguientes picos representativos, MC1: 704 cm^{-1} , 782 cm^{-1} ; MC2: 746 cm^{-1} ; MC3: 778 cm^{-1} pertenecientes al grupo benceno. MC1: 1033 cm^{-1} , MC2: 1444 cm^{-1} , 1027 cm^{-1} , MC3: 1033 cm^{-1} , correspondiente al grupo amina. MC1: 2846 cm^{-1} ; MC2: 2851 cm^{-1} ; MC3: 2924 cm^{-1} , todos estos picos pertenecientes al grupo carboxilo. Estos 3

compuestos son importantes para que el plástico posea la característica de centellador. Los picos representativos obtenidos en los prototipos fueron los siguientes, M1:741 cm^{-1} ; M2: 741 cm^{-1} ; M3: 743 cm^{-1} ; M4: 746 cm^{-1} ; M5; 701 cm^{-1} , 738 cm^{-1} , pertenecientes al grupo benceno. M1 y M2: 1121 cm^{-1} , M3: 1118 cm^{-1} ; M4: 1064 cm^{-1} ; M5: 1063 cm^{-1} , correspondientes al grupo amina. M1: 1725 cm^{-1} , M2: 1718 cm^{-1} , M3: 1723 cm^{-1} , muestra4: 1725 cm^{-1} , muestra5: 1720 cm^{-1} , picos que corresponden al grupo carboxilo. Se puede apreciar claramente que en las muestras de referencia y en las muestras de los prototipos, poseen los mismos compuestos, pero en los prototipos las sustancias añadidas no fueron las adecuadas. Para que exista el efecto centellante del plástico se necesitan de la mezcla de dos compuestos, el primero denominado centellador primario y el segundo conocido como desplazador de longitud de onda (wavelength shifter), al no contar con estos dos compuestos que actúen conjuntamente los prototipos no presentan la característica física de ser un material centellante.

- Con el análisis del FTIR realizado en las tres muestras de referencia (comerciales) y en las muestras prototipo, la muestra 3 presenta fluor pero presenta coloración. Mientras que la muestra 4 no presenta flúor alcanos, pero es la que más se asemeja a un centellador.

RECOMENDACIONES

- Continuar con investigaciones que permita la construcción de centelladores plásticos en el Ecuador para reemplazar materias primas de centelladores comerciales por materiales existentes en el país, de manera que su construcción signifique un costo menor.
- Envolver de manera correcta los centelladores plásticos ya que, si tienen alguna entrada de luz, no será posible que el PMT reciba la radiación, y no pueda ser leído mediante pulsos eléctricos en el computador.
- Es importante realizar prueba de atenuación para determinar si los plásticos detectan otro tipo de radiación dependiendo de la longitud de onda.
- Probar otros tipos de materiales comerciales que contienen grupos aromáticos en su estructura química como el PET, el policarbonato u otros.
- Es preferible que al momento de realizar la mezcla se lo haga en un material plástico que tenga un grosor resistente al calor o algún material fácil de romper, como el vidrio, para que la muestra al solidificarse no se adhiera a las paredes del material base.
- No mezclar el octoato de cobalto y el Mek son inflamables, pueden ser explosivos, los vapores causan irritación en el tracto respiratorio y el contacto con los ojos puede causar daño. Tener cuidado al momento de manipular la resina, porque emana un olor fuerte que causa irritación en el tracto respiratorio.

GLOSARIO

LEOPARD	Laboratorio de Detección de Partículas y Radiación
LAGO	LatinamericanGianObservatory
ESPOCH	Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
EPN	Escuela Politécnica Nacional
USFQ	Universidad San Francisco de Quito
PMT	Fotomultiplicador
SiPMs	Fotomultiplicadores de Silicio
DSC	Calorimetría diferencial de barrido
TGA	Análisis termogravimétrico
TMA	Análisis Termomecánico
FTIR	Espectrometría de luz infrarroja por transformada de fourier
nm	Nanómetros
ml	Mililitros
m	Metros
cm	Centímetros
mm	Milímetros
MeV	Mega electrón-voltio
μs	Microsegundos
PPO	2,5 -difeniloxazol
POPOP	1,4 - bis [2- (feniloxazolil)] - benceno

g/cm³ Gramos por centímetro cubico

UV Ultraviolete-Visible

DAQ Tarjeta de adquisición de datos

BIBLIOGRAFÍA

ANON. *Lublearn* [en línea]. 2014. [consulta: 21 de Marzo 2017]. Disponible en: <http://norio.mx/lublearn/espectrometria-infrarroja-por-transformadas-de-fourier/>

ARGULLÓ, M. J. *Evaluación de los fotomultiplicadores de silicio (sipm) como alternativa a los fotomultiplicadores de tubo de vacío (pmt) en un front-end integrado para aplicaciones pet*". [En línea]. 2008. [consulta: 31 Enero 2017]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/13140/Memoria.pdf?sequence=1>

BENÍTEZ DE LUGO, M. A. " Cien Años de Rayos Cósmicos ". *Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* [en línea], 2011, 105 (1), pp. 107-128. [consulta: 15 Enero 2017]. Disponible en: <http://www.rac.es/ficheros/doc/01013.pdf>

BILLMEYER, F. W. *Ciencia de los Polímeros* [en línea]. New York-USA: Reverté, 1975. [consulta: 15 Diciembre 2016]. Disponible en: https://books.google.com.ec/books?id=vL9QrpOKsQcC&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

CACERES. *Thermomechanical Analysis – TMA*. [en línea]. s.f. [consulta: 9 Enero 2017]. Disponible en: http://labotronic.es/sec_din/archivos/docs/export-3-151.pdf

CALVO, C; MALDONADO, N. *Unidad de Análisis Térmico*. [en línea]. 2008. [consulta: 9 Febrero 2017]. Disponible en: http://www.uam.es/ss/Satellite/es/1242668322022/1242666562032/UAM_Laboratorio_FA/laboratorio/Laboratorio_de_Analisis_Termico.htm

CARVAJAL, E. E. *Capítulo 2. Radiación ionizante*. [en línea]. 2011. [consulta: 2 Marzo 2017] Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/5292/3/eduarenriquecarvajaltaborda.2011.parte3.pdf>

COAN, T; Ye, J. *Muon Physics* [en línea]. 2005. [consulta: 21 Septiembre 2016]. Disponible en: <http://www.physics.rutgers.edu/ugrad/389/muon/muonphysics.pdf>

CRESPO, J. I. Estudio de la emisión de luz en los tubos fotomultiplicadores del experimento Double Chooz [en línea] (tesis). (Maestría) Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Físicas, Madrid. 2011. pp.13-18. [consulta: 13 Octubre 2016]. Disponible en:

http://nuclear.fis.ucm.es/fisica_nuclear/TRABAJOS%20DEFENDIDOS/JUNIO-2011/BATFM_JCrespo_PMT.pdf

EVITCH, I. *Detectores centelladores*. [en línea]. 2013. [consulta: 26 Agosto 2016]. Disponible en: <http://materias.df.uba.ar/labo5a2013v/files/2013/02/Centelladores.pdf>

Fermilab. *QuarkNetter Reports*. [blog]. [consulta: 12 Noviembre 2016]. Disponible en: <http://quarknet.fnal.gov/toolkits/ati/fnaldet.html>

FERNOW, R. C. *Introduction to Experimental Particle Physics* [en línea]. Sydney: British Library, 1989, p. 153. [consulta: 15 Diciembre 2016]. Disponible en: https://books.google.com.ec/books?id=WNhMzhm0SscC&pg=PR10&lpg=PR10&dq=FERNOW,+R.+C.,Introduction+to+Experimental+Particle+Physics&source=bl&ots=Hd3nYqqt_n&sig=vwHsddL_h5NI23OuLBncm0zfjxw&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjlx4zUj6rUAhWBayYKHcUfB0YQ6AEIJjAA#v=onepage&q=FERNOW%2C%20R.%20C.%2CIntroduction%20to%20Experimental%20Particle%20Physics&f=false

FISICO, J. *Detección por centelleo* [en línea]. 2009. [consulta: 3 Enero 2017]. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/136968914/4-Detectores-de-Centelleo>

General purpose plastic scintillator EJ-200, EJ-204, EJ-208, EJ-212 [en línea].USA, s.f., p. 2. [Consulta: 24 Agosto 2016]. Disponible en: http://www.eljentechnology.com/images/products/data_sheets/EJ-200_EJ-204_EJ-208_EJ-212.pdf

GONZÁLEZ, M. Caracterización de un Detector de Centelleo para la determinación de composición de Rayos Cósmicos Primarios en el observatorio Pierre Auger [en línea] (tesis). (Maestría). Universidad Nacional de Cuyo, Argentina. 2012. pp. 47-65. [consulta: 21 de Febrero 2017]. Disponible en: <http://fisica.cab.cnea.gov.ar/particulas/html/labdpr/student/maestria-gonzalez.pdf>

GREIDER, P. *Cosmic Rays at Earth* [en línea]. Elsevier, 2001. [consulta: 15 Diciembre 2016]. Disponible en: <https://www.elsevier.com/books/cosmic-rays-at-earth/greider/978-0-444-50710-5>

HART, R. *Cosmic Ray Astronomy* [en línea]. s.f.. [consulta: 7 Enero 2017]. Disponible en: www.hardhack.com.au

HOYOS, S. M; FLORES, P. P. "Tipos de Radiacion, Aplicaciones, Beneficios y Riesgos". *Scielo* [en línea]. 2013, 37, p. 2 [consulta: 2 Marzo 2017]. Disponible en: http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?pid=S2304-37682013001000003&script=sci_arttext

ITE. *Particulas alfa*. [en línea] s.f. [consulta: 31 Enero 2017]. Disponible en: http://newton.cnice.mec.es/materiales_didacticos/partalfa/partalfa.html

JIMENEZ. *Tubo fotomultiplicador* [en línea]. s.f.. [consulta: 31 Enero 2017]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/130926165/Tubo-fotomultiplicador-1P28-1-pdf>

KNOLL, G. *Radiation detection and measurement* [en línea]. 2000, pp. 44. [consulta: 24 Agosto 2016]. Disponible en: https://books.google.com.ec/books/about/Radiation_Detection_and_Measurement.html?id=4vTJ7UDel5IC&source=kp_cover&redir_esc=y

LUGO, M. A. B. *Rayos cósmicos y mensajeros del cielo* [en línea]. 2008. [consulta: 27 Diciembre 2016]. Disponible en: http://www.rac.es/6/6_2_2.php?idC=221&idN3=30

MCDONALD, A. B; KAJITA, T., 2015. That neutrinos oscillate, and this proves that these elusive particles have mass.. *Journal*, pp. 31-56.

MINAYA, I. *Composición de la radiación cósmica de ultra-alta energía a partir de los datos del Observatorio Pierre Auger* [en línea]. 2011. [consulta: 3 Febrero 2017]. Disponible en: http://eprints.ucm.es/13316/2/trabajo_master_ignaciominaya.pdf

MOSER, S; et al."Principles and Practice of Plastic Scintillator design. Radiation Physics and Chemistry". *Journal* [en línea]. 1993, pp. 31-36. [consulta: 24 Agosto 2016]. Disponible en: <http://docslide.net/documents/principles-and-practice-of-plastic-scintillator-design.html>

Muon Basics. *The Origin of Muons*. [blog] [consulta: 3 Febrero 2017]. Disponible en: <http://www2.fisica.unlp.edu.ar/~veiga/experiments.html>

National Instruments. *Adquisición de Datos DAQ*. [blog] [consulta: 31 Enero 2017]. Disponible en: <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>

PARADA, D; et al. "Obtención, Electrodeposición y Caracterización de un Recubrimiento Polimérico Bioabsorbible a partir de ácido L-Láctico para aplicaciones Biomédicas". *Scielo* [en

línea]. 2009, XVII(3), pp. 365-374. [consulta: 24 Agosto 2016]. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052009000300010

PIQUÉ, T. M; VÁZQUEZ, A. "Uso de Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) en el estudio de la hidratación del cemento". *Scielo* [en línea]. 2012, III(2), pp. 62-71. [consulta: 13 Enero 2016]. Disponible en: <http://www.imcyc.com/ccid.ojs/index.php/ccid/article/download/28/25>

REDONDO, L. "Propiedades térmicas de materiales". *Consejo Superior de Investigaciones Científicas* [en línea], 2016, (España), p. 15. Disponible en: <http://www.csic.es/nuevos-materiales>

ROSSI, B. *High Energy Particle*. EEUU, New York: Prentice Hall, 1952, pp 52-58.

RUIZ ÁVILES, G. "Obtención y Caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca". *Redalyc* [en línea]. 2006, II(4), pp. 5-28. [consulta: 24 Agosto 2016]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/835/83520401.pdf>

RUNDO, E. Detección y Estudio de Rayos Cósmicos en la Zona Ecuatorial con diferentes Alturas utilizando Detectores de Centelleo Plásticos. [en línea] (tesis) (Pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Ecuador. 2013, pp. 4-82.. [consulta: 13 Febrero 2017]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/6412/1/CD-4944.pdf>

SÁNCHEZ, E. *Partículas Alfa* [en línea]. 2013. [consulta: 27 Diciembre 2017]. Disponible en: http://materias.fi.uba.ar/6213/alfa_barrera.pdf

SOLÍS, J. A. *Los efectos gravitatorios cuanticos en los rayos cosmicos de energias ultraaltas*. [en línea]. s.f. [consulta: 9 Enero 2017]. Disponible en: <http://www.fis.puc.cl/~jalfaro/fiz1111/charla/rcae3.pdf>

SPRINBERG, G. G; LEMA, C. R. *Fenómenos nucleares y sus aplicaciones* [en línea]. Montevideo: DIRAC, 2011. [Consulta: 13 Marzo 2017]. Disponible en: http://divnuclear.fisica.edu.uy/libro/Para_entender_las_radiaciones.pdf

TSOULFANIDIS, N; LANDSBERGER, S. *Measurement and Detection of Radiation*. 4^{ta} ed. USA-New York. CRC Press, 2014, p. 204.

WALKER, J. "Characteristics of plastic scintillators in their use as large area particle detectors". *Science* [en línea]. North-Holland, 1968, pp. 131-134. [consulta: 22 Noviembre 2016]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029554X69906983>

WILCHES, M., RUIZ, L. F. & HERNÁNDEZ, M. *Bioingeniería* [en línea]. Medellín: Universidad de Antioquia, 2007. [Consulta: 10 Agosto 2016]. Disponible en: https://books.google.com.ec/books?id=2DZYwx7p8csC&pg=PR4&lpg=PR4&dq=WILCHES%2C%20Bioingenieria.%20Medellin%3A%20Universidad%20de%20Antioquia.&source=bl&ots=7dKbXoUhoI&sig=iwxjH-_6JjZV7BamhBwg9hPKV1U&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=WILCHES%2C%20Bioingenieria.%20Medellin%3A%20Universidad%20de%20Antioquia.&f=false

ZALDIVAR, I; CORNEJO, R. *Departamento de Programas Audiovisuales* [en línea]. 2011. [consulta: 3 Febrero 2017]. Disponible en: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Tabla_de_IR_20785.pdf

ZU, J; et al. "The impact of fluorescent dyes on the performances of polystyrene-based plastic scintillators". [En línea], *Nuclear Instruments and Methods in Physics A*, 2016. 835 pp 136-141. [Consulta: 26 Agosto 2016]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900216308361>

ANEXOS

ANEXO A. Propiedades de los centelladores comerciales EJ-200, EJ-204, EJ-208, EJ-212

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 1- A. Propiedades de algunos plásticos centelladores. (TECHNOLOGY, 2016)

ANEXO B. Obtención de datos utilizando tres centelladores plásticos para la detección de partículas cósmicas.

Materiales

- 3 centelladores plásticos
- Fotomultiplicador
- Fuente de energía
- DAQ
- Cables de extensión de señal
- Computador

CALIBRACION DE DETECTORES

Para calibrar los detectores que estaban en funcionamiento dentro del laboratorio se inició por designar el voltaje ideal con el cual se quedaría ejecutando el programa y captando datos, cada canal debió llegar entre 40-60 cuentas/minuto lo que equivale a 2400- 3600 cuentas/min de esta forma cada canal quedó calibrado, los canales a calibrarse fueron:

- a. Canal 0 (CH0)
- b. Canal 1 (CH1)
- c. Canal 2 (CH2)

La optimización se realizó entre dos canales manteniendo fijo el voltaje de un canal como referencia y variando el otro canal esto es:

Tabla 1- B. Tabla de Combinaciones para la calibración.

COMBINACIONES	CANAL FIJO
CH0 - CH1	CH0
CH0 - CH2	CH0
CH1 - CH0	CH1

Realizado por: Caterine Carrasco y KelmyDiaz

Y utilizando el programa de Excel “CounterPlateauingProcedure” realizado en Noviembre del 2011, para convertir el lenguaje alfanumérico en datos numéricos. Se grafican en el mismo programa las coincidencias por minuto de cada canal en función del voltaje y el número de cuentas/min.

Step #	Starting Time	Ref. Ch.0	Test Ch.1	Ending Scale: HV Values	Count Rates & Uncertainty (decimal)	Coincidence	Accidental Coincidence Rate as %
Step #1				S0 (HV) S1 (test) S4 (coins)	S0 S1 S1 S1 S4 S4		
21					0	0	0
22					0	0	0
23					0	0	0
24					0	0	0
25					0	0	0
26					0	0	0
27					0	0	0
28					0	0	0
29					0	0	0
30					0	0	0
31					0	0	0
32					0	0	0
33					0	0	0
34					0	0	0
35					0	0	0
36					0	0	0
37					0	0	0
38					0	0	0
39					0	0	0
40					0	0	0
41					0	0	0
42					0	0	0
43					0	0	0
44					0	0	0

Figura 1- B. Programa CounterPlateauingProcedure

Una vez que los datos se han ingresado a la plataforma creada en Excel los valores obtenidos cambian de alfanuméricos a numéricos.

Step #	Starting Time	Ref. Ch.0	Test Ch.1	Ending Scale: HV Values	Count Rates & Uncertainty (decimal)	Coincidence	Accidental Coincidence Rate as %
Step #1				S0 (HV) S1 (test) S4 (coins)	S0 S1 S1 S1 S4 S4		
21		350	572	0	0	1294	27.2362
22		400	490	1	1	1275	26.2219
23		451	526	3	3	1338	28.3843
24		502	530	2F	1F	1328	28.4417
25		552	538	18C	17C	1320	28.2628
26		602	4E6	3C3	2B3	1254	25.4189
27		652	4E2	9A2	298	1211	24.7494
28		701	4E4	EF3	298	1252	25.3838
29		754	47B	197B	2D0	1275	26.7071
30		801	504	2E5B	2D3	1284	26.8326
31		854	541	5E8A	31E	1345	28.7742
32		902	507	9499	2F1	1328	28.4417
33		956	4D0	B0C2A	4D8	1245	26.2848
34		743	1005	524	F0E3	1316	28.2787
35						0	0
36						0	0
37						0	0
38						0	0
39						0	0
40						0	0
41						0	0
42						0	0
43						0	0
44						0	0

Figura 2- B. Cambio de datos alfanuméricos a numéricos

Se obtuvieron gráficas de los tres canales.

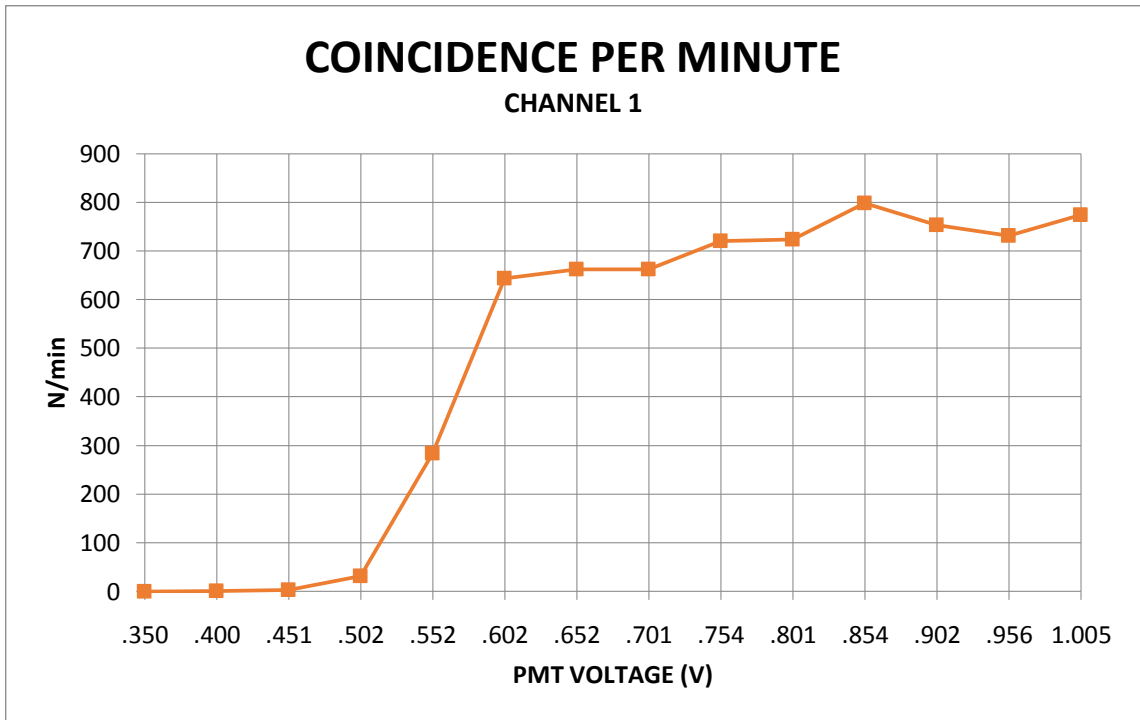


Figura 3- B. Obtención de la curva del primer canal N/min vs Voltaje

Step #2	Ch.0	Ch.2	S0 (test)	S2 (test)	S4 (count)	S0	S2	S4	S0	S2	S4	S0	S2	S4	Rate sp/s	
50	281	521	0	0	153	36,2352	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
51	400	521	0	0	143	36,3417	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
52	451	501	0	0	1285	35,8881	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
53	501	400	3	0	1244	35,2194	3	17,2000	0	0	0	0	0	0	0	
54	555	410	0	0	1270	35,9271	13	3,6855	6	2,44949	0,00%	0	0	0	0	
55	615	400	42	18	1243	35,2562	68	8,12404	27	5,18815	0,00%	0	0	0	0	
56	652	501	173	82	1257	35,9141	271	10,2394	180	12,1594	0,00%	0	0	0	0	
57	709	500	107	103	1280	35,7771	883	31,9528	466	21,587	0,00%	0	0	0	0	
58	760	521	815	213	1313	36,2252	1782	42,2137	521	23,0434	0,00%	0	0	0	0	
59	815	510	635	208	1386	36,1886	3252	51,0351	520	22,8025	0,00%	0	0	0	0	
60	855	451	1250	205	1249	35,3412	4888	68,463	517	22,7276	0,00%	0	0	0	0	
61	894	502	1870	218	1262	35,3495	7037	83,8888	529	23,4884	0,00%	0	0	0	0	
62	970	506	2980	224	1284	35,9722	30588	102,802	548	23,4994	0,00%	0	0	0	0	
63	1008	503	3915	224	1283	35,818	14559	120,242	554	23,5272	0,00%	0	0	0	0	
64	1102	515	7870	224	1201	36,0834	21757	176,142	570	23,5747	0,00%	0	0	0	0	
65	1201	410	8182	230	1276	35,7211	46306	215,388	573	23,5274	0,00%	0	0	0	0	
66	1303	418	1181	223	1272	35,6851	49555	222,81	547	23,388	0,00%	0	0	0	0	
67	1400	515	1700	231	1289	36,4412	92322	235,915	551	23,6594	0,00%	0	0	0	0	
68																
69																
70																
71																
72																
73																
74																
75																
76																
77																
78	Step #3	Ch.0	Ch.3	S0 (test)	S2 (test)	S4 (count)	S0	S2	S4	S0	S2	S4	S0	S2	S4	Rate sp/s
79																
80																
81																
82																
83																
84																
85																

Figura 4- B. Cambio de datos de alfanuméricos a numéricos del canal 2

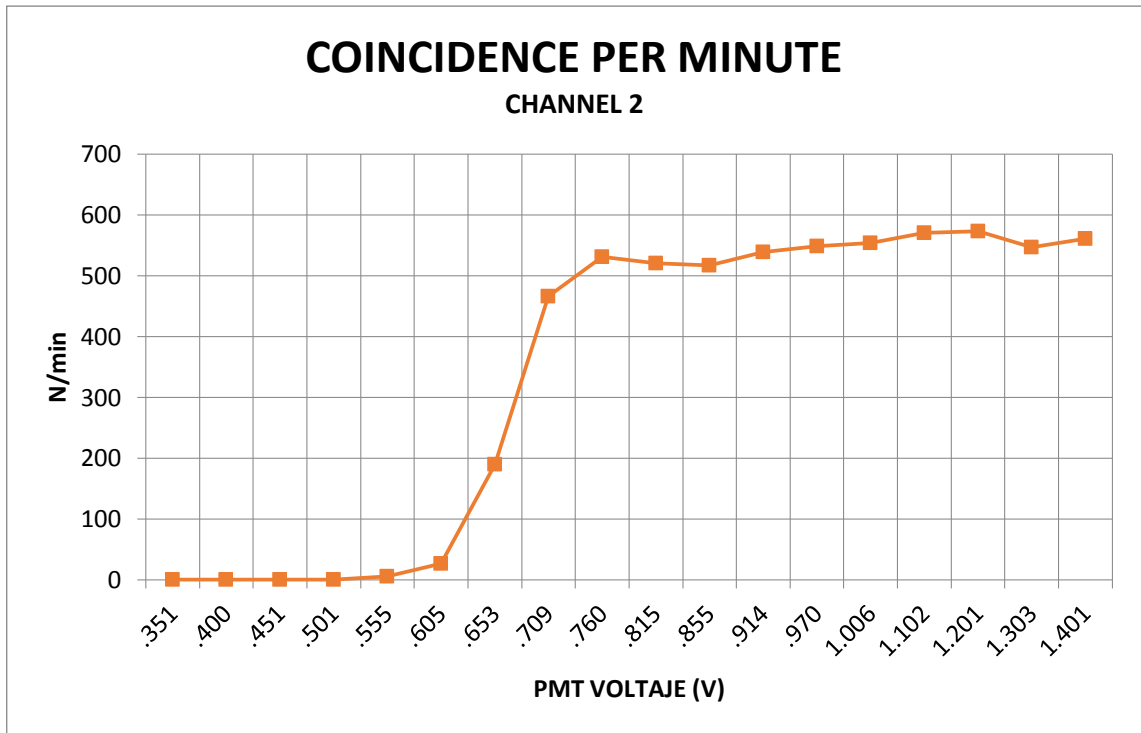


Figura 5- B. Curva del número de coincidencia para el canal 2 N/min vs Voltaje

Step #4	Ch1	Ch0	S0 (test)	S1 (ref)	S4 (coins)	S0 (test)	S1 (ref)	S4	S4	Rate as %
386	0	FAS	0	0	0	4905	63,285	0	0	
406	0	FZ2	0	0	0	3822	62,629	0	0	
450	0	FRE	0	0	0	3958	62,244	0	0	
501	0	F08	0	0	0	3848	62,032	0	0	
555	3	F0B	7	9	2	3831	62,697	7	2,84976	0,00%
602	34	F0B	28	42	7,210	3531	62,697	40	6,32046	0,00%
651	FC	EE2	BE	262	16,8745	3810	61,7252	190	13,784	0,00%
700	2F5	F0B	245	767	27,5138	3867	62,895	581	24,1038	0,00%
756	608	F16	296	1645	33,2467	3861	62,195	670	28,9844	0,00%
806	A52	F31	26D	2842	9,4404	3888	62,3618	701	28,4764	0,00%
856	10A2	F36	308	4263	65,3176	3904	62,4018	777	27,8147	0,00%
803	10C3	F30	30C	5065	71,8688	3888	62,3638	760	27,8386	0,00%
854	178F	EC3	304	6047	77,7625	3784	61,543	772	27,7848	0,00%
903	1008	285	FCT	396	14,57	4935	63,963	98	30,2695	0,00%

Figura 6- B. Cambio de datos alfanuméricos a numéricos para el canal 0

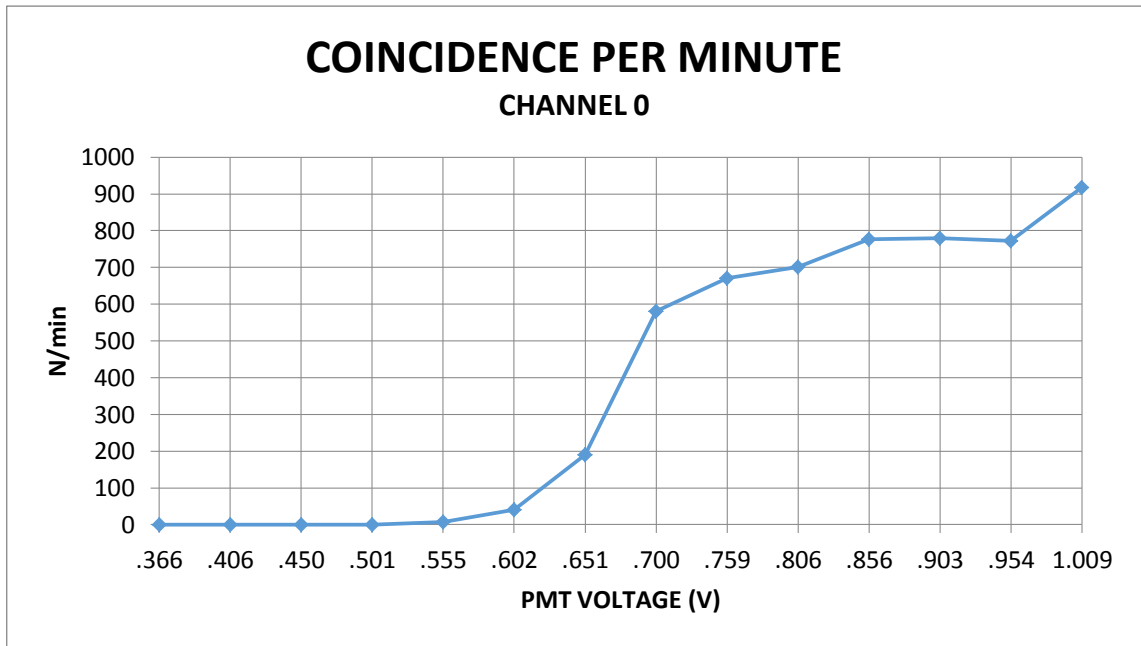


Figura 7- B. Curva del número de coincidencia para el canal 0 N/min vs Voltaje

El valor que fue utilizado como estándar dependió de las gráficas en este caso nos basamos en el valor en que las curvas muestren una línea completamente horizontal. El paso siguiente consistió en obtener el voltaje ideal para el Trigger que es el cual se varió a partir de 100Mv hasta 1 voltio de 100 en 100 cada variación de valor durante 1 minuto. Con la finalidad de encontrar el valor del trigger que no afecté el número de cuentas y a su vez que en la gráfica forme una línea constante.

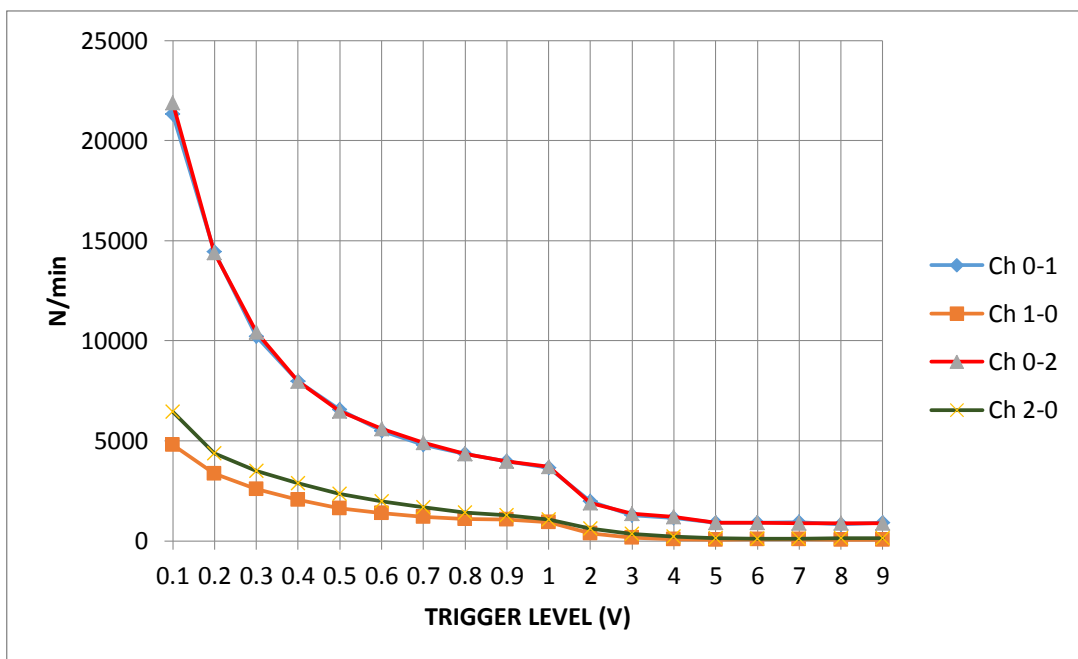


Figura 8- B. Comparación entre los 3 canales 0,1 y 2. La prueba de canales se realizó entre: 0-1, 1-0, 0-2 y 2-0.

La figura 8-B muestra la comparación de las curvas dadas entre N/min vs Voltaje de los tres canales, pero variando cada canal de dos en dos esto es Ch 0-1, Ch 1-0, Ch 0-2 y Ch 2-0. El valor elegido como ideal para el trigger se encuentra entre 3 y 4 Voltios.

ANEXO C. Sistema de detección de muones.

En la Tabla 1-C, se muestra los componentes utilizados para la detección de radiación.



Figura 1- C. Sistema Electrónico utilizados para la detección de muones.

Fuente: Caterine Carrasco;KelmyDiaz. 2017

Tabla 1- C Componentes utilizados para la detección de muones

Etiqueta	Equipo
1	Contadores de centelleo
2	Cables de extensión de señal
3	DAQ
4	Módulo de GPS
5	Cable de GPS
6	Fuente de poder
7	Computadora

Realizado por: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017

1. Fotomultiplicadores (PMT)

El fotomultiplicador es un dispositivo, cuya funcionalidad es la de convertir la luz recibida en corriente eléctrica. Debido a los progresos en el desarrollo de los fotocátodos y en las etapas de amplificación, el fotomultiplicador en los últimos años ha sido muy usado. Son utilizados en diferentes aplicaciones, la ventaja que presenta es en la amplificación por emisión secundaria.

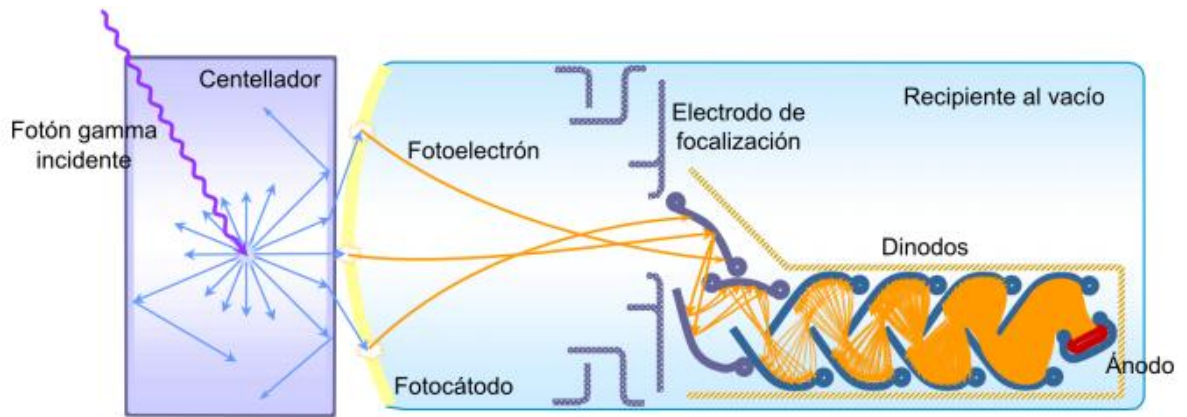


Figura 2- C. Esquema del interior de un fotomultiplicador acoplado a un centellador. (Crespo, 2011)

El tubo fotomultiplicador se encuentra acoplado a un material centellador, es un recipiente de vidrio como se muestra en la figura del Anexo 3-2. La cara que está en contacto con el cristal de centello está cubierta en su interior por un material que emite electrones al momento de recibir luz (fotocátodo) operando como una celda fotoeléctrica. Los electrones son acelerados y multiplicados en campos eléctricos entre electrodos llamados dinodos. En el último de ellos la señal eléctrica es lo suficientemente grande como para ser manipulada con amplificadores y analizadores de pulsos convencionales.

2. Tarjeta de Adquisición de datos (DAQ)

Es una tarjeta encargada de medir fenómenos eléctricos o físicos como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido mediante un computador. El sistema consiste de sensores, hardware de medidas DAQ y una PC con software programable. Los sistemas DAQ comparados con los sistemas de medidas tradicionales, basados en PC aprovechan la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de las PCs estándares en la industria proporcionando una solución de medidas más potente, flexible y rentable.

Los elementos como amplificadores, discriminadores, circuitos de coincidencia se encuentran asociados a la tarjeta de datos elaborada por Quarknet. Las señales eléctricas que se generan en los fotomultiplicadores no pueden ser visualizadas si los elementos mencionados anteriormente no se encuentran fusionados. El detector cuenta con un GPS incorporado a la DAQ, permitiendo conocer la posición y el tiempo en el que inciden los rayos cósmicos. La DAQ se conecta al computador mediante un puerto USB.

3. Fuente de Energía

La fuente de distribución de energía es alimentada por la DAQ y suministrada por medio de cables monoaxiales, consta de cuatro potenciómetros que permiten el cambio del voltaje de operación de cada fotomultiplicador independientemente.

ANEXO D. Tablas para la interpretación básica de espectros en la región infrarroja.

Enlace	Tipo de enlace	Tipo específico de enlace	Numero de onda e intensidad de absorción
C-H	alquilo	metilo	ν 2850, 2960 cm^{-1} (ambos de fuerte a medio) δ 1460 cm^{-1} (fuerte), 1380 cm^{-1} (débil)
		metileno	ν 2850, 2925 cm^{-1} (ambos, de fuerte a medio) δ 1470 cm^{-1} (fuerte)
		metino	ν 2890 cm^{-1} (débil)
	vinilo	C=CH ₂	ν 2975, 3080 cm^{-1} (medio) δ 990 y 910 cm^{-1} (fuerte)
		C=CH	ν 3200-3100 cm^{-1} (medio)
		Alquenomonosustituido	δ 900, 990 cm^{-1} (ambos fuertes)
		Alquenocis-disustituido	δ 670-700 cm^{-1} (fuerte)
		Alquenotrans-disustituido	δ 965 cm^{-1} (fuerte)
		Alquenotrisustituido	δ 800-840 cm^{-1} (fuerte a medio)
	Aromático	Benceno/benceno sustituido	ν 3150-3050 cm^{-1} (débil) δ fuera del plano 950-650 cm^{-1} , dependiendo de la sustitución:
		Benceno monosustituido	770-730 cm^{-1} (fuerte) y 700±10 cm^{-1} (fuerte)
		Benceno orto-sustituido	770-732 cm^{-1} (fuerte)
		Benceno-metasustituido	810-750 cm^{-1} (fuerte) y 710-690 cm^{-1} (fuerte)
		Benceno-parasustituido	840-790 cm^{-1} (fuerte)
alquino		ν 3325-3250 cm^{-1} (medio) δ 750-650 cm^{-1}	
aldehído		Resonancia de Fermi 2720, 2820 cm^{-1} (medio)	
O-H	Alcoholes, fenoles		ν 3650-3200 cm^{-1} banda ancha por polimerización δ 1500-1300 cm^{-1} y 650 cm^{-1}
	Ácidos carboxílicos		ν 3000-2500 cm^{-1} δ_{OH} 1420 cm^{-1} δ_{COOH} 1300-1200 cm^{-1}
N-H	aminas	R-NH ₂	ν 3500 cm^{-1} (2 bandas fuertes en aminas primarias, 1 banda de medio a débil en aminas secundarias)
		Ar-NH ₂	ν 3400 cm^{-1} (2 bandas fuertes en aminas primarias, 1 banda de medio a débil en aminas secundarias) δ 1560-1640 cm^{-1} (fuerte)
		-NH ₂	δ en el plano 1560-1640 cm^{-1} (fuerte) δ fuera del plano 900-650 cm^{-1} (fuerte)
	Iones amonio		Se ensancha con múltiples picos entre 2400-3200 cm^{-1}
C=C		Vinilo, metilo terminal, cis, trans	ν 1640-1680 cm^{-1} (medio)

C≡C	C=C acíclico	Alqueno tri y tetrasustituido	ν 1679 m^{-1} (débil)	
	C=C conjugado	Dienos, polienos	ν 1600-1650 m^{-1} (fuerte)	
		Con anillo de benceno	ν 1625 m^{-1} (fuerte)	
		Con C=O	ν 1600 m^{-1} (fuerte)	
	C=C aromático		ν 1450, 1500, 1580, 1600 m^{-1} (fuerte a débil) – siempre los 4	
C=C	Alquino terminal		ν 2100-2140 m^{-1} (débil)	
	Alquino disustituido		ν 2190-2260 m^{-1} (muy débil, a veces no visible)	
C=O	Cetona/aldehído	Alifáticos saturados/ ciclos de 6 miembros	ν 1720 cm^{-1}	
		α, β -insaturado	ν 1685 cm^{-1} (también va para cetonas aromáticas)	
		Ciclo de 5 miembros	ν 1750 cm^{-1}	
		ciclo de 4 miembros aldehído	ν 1775 cm^{-1}	
	Derivados de ácido carboxílico	Ácido carboxílico saturado		ν 1725-1700 cm^{-1}
		Ácido carboxílico insaturado/aromático		ν 1680-1690 cm^{-1}
		Ésteres y lactonas		ν 1750-1735 cm^{-1} (influencia de la conjugación y el tamaño del anillo como en las cetonas)
		Anhídridos		ν 1760 (sim) y 1820 (asim) cm^{-1} (ambos)
		Halogenuros		ν 1800 cm^{-1}
		Amidas		ν 1670-1640 cm^{-1} (asim) cm^{-1} (ambos)
		Sales de carboxilatos		ν 1550-1610 cm^{-1} (también va para zwitteriones aminoácidos)
	C-O	alcoholes	Primarios	ν 1050 \pm 10 cm^{-1}
			Secundarios	ν alrededor de 1100 cm^{-1}
Terciarios			ν 1150-1200 cm^{-1}	
Fenoles			ν 1200 cm^{-1}	
éteres		Alifáticos y cíclicos		ν 1150-1070 cm^{-1}
		Aromáticos y vinílicos		1275-1200 cm^{-1}
Ácidos carboxílicos				δ 1250-1300 cm^{-1}
ésteres				ν simétrico y asimétrico. Dos bandas entre 1300-1050 cm^{-1} Banda de mayor intensidad: 1180 cm^{-1} formiato 1240 cm^{-1} acetato 1190 cm^{-1} alquil éster 1165 cm^{-1} metil éster

Enlace	Tipo de enlace	Tipo específico de enlace	Numero de onda e intensidad de absorción
C-N C=N C≡C	Aminas alifáticas		ν 1020-1220 cm^{-1} (frecuentemente sobrepuestas)
	Grupo nitro		ν 870 cm^{-1}
	C=N		ν 1615-1700 cm^{-1} (efectos de conjugación similares a C=O)
	Nitrilos (enlace triple C-N)		ν 2210-2260 cm^{-1} (no conjugado 2250, conjugado 2230 cm^{-1})
	Isonitrilos (enlace R-N-C)		ν 2165-2110 cm^{-1} (2140-1990 cm^{-1} para R-N=C=S)
C-X (X=F, Cl, Br, I)	fluoroalcanos	ordinarios	ν 1000-1100 cm^{-1}
		trifluorometilo	ν dos fuentes, se ensancha entre 1100-1200 cm^{-1}
	cloroalcanos		ν 540-760 cm^{-1} (medio a débil)
	bromoalcanos		ν abajo de 600 cm^{-1}
	iodoalcanos		ν abajo de 600 cm^{-1}
N-O	Compuesto nitro	alifático	ν 1550 cm^{-1} (asim) (mas fuerte) y 1370 cm^{-1} (sim) (más débil)- Siempre ambas
		aromáticos	ν 1520 (asim), 1350 cm^{-1} (sim) (la conjugación usualmente baja el número de onda)

Fuente: (Zaldivar & Cornejo, 2011)

Realizado por: Caterine Carrasco; Kelmy Díaz. 2017