



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**ELECTRICA – INSTRUMENTACIÓN**

**ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SENSOR**  
**HÍBRIDO DE PARTÍCULAS RADIOACTIVAS**

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

PRESENTA:  
ING. IVAN DE JESÚS CORONA PÉREZ

TUTOR PRINCIPAL

DR. GABRIEL EDUARDO SANDOVAL ROMERO, CCADET

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. ENERO 2017



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

**Presidente:**                    **Dra. Sánchez Pérez Celia Angelina**  
**Secretario:**                 **Dr. Cuevas Cardona Salvador Carlos**  
**Vocal:**                         **Dr. Sandoval Romero Gabriel Eduardo**  
**1 er. Suplente:**             **Dr. Ramírez Jiménez Francisco Javier**  
**2 do. Suplente:**             **Dr. Varela González Armando**

**Lugar o lugares donde se realizó la tesis:**  
**Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (UNAM)**  
**Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ)**

TUTOR DE TESIS:

**DR. GABRIEL EDUARDO SANDOVAL ROMERO**

-----  
FIRMA

## AGRADECIMIENTOS

A cristo Señor de las Llagas, porque siempre está detrás de mí y permitió que alcanzaré un logro más en mi vida.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la oportunidad de realizar el posgrado en la modalidad de medio tiempo.

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico por el apoyo otorgado por medio del proyecto PAPIIT IT101515 Sensor en fibra óptica de ultrasonido, implementado para determinar características físicas y estructurales en materiales.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares por apoyarme en la realización del posgrado.

Al Dr. Eduardo Sandoval por brindarme su apoyo académico y personal siempre que lo necesite.

Al Dr. Armando Varela y al Dr. Francisco Ramírez por ofrecerme su apoyo para realizar la investigación.

A la Dra. Celia Sánchez por el interés mostrado en la investigación.

Al Dr. Salvador Cuevas por el tiempo entregado a la revisión de la tesis.

Al Fis. Rafael Policroniades y al Quím. Eliud Moreno por el apoyo en la realización de la investigación.

Al Ing. Antonio Vela †, donde quiera que este, gracias por el apoyo y conocimientos brindados.

A Ing. Bertha Ruiz, por la amistad incondicional.

A la Ing. Edwina Garcia y el Ing. Rubén Gómez por el respaldo profesional en la realización del posgrado.

A los compañeros del ININ que siempre me alentaron a realizar el posgrado, Victor, Israel, Faustina, Rosita, Julio, gracias por el apoyo que me brindaron.

A cada uno de los profesores del posgrado por los conocimientos brindados.

Finalmente deseo agradecer a todas aquellas personas que me ayudaron durante mi estancia en el posgrado y en la elaboración de esta tesis. A todos gracias

## **DEDICATORIAS**

Este trabajo está dedicado al angelito que cambio mi ser.  
Para ti hija espero y sea una inspiración en tu vida.

A mi esposa Diana por estar a mi lado todos estos años.

A mis padres Jesús Corona y Esperanza Pérez por ser  
mi inspiración a lo largo de mi vida.

A mis hermanos Saul y Amairani, por brindarme  
su cariño todos estos años.

Al Señor de las Llagas por bendecirme.

# INDICE

INDICE DE FIGURAS .....	I
INDICE DE TABLAS .....	IV
LISTA DE SÍMBOLOS Y/ O NOMENCLATURA .....	V
I. RESUMEN .....	1
II. ABSTRACT.....	3
III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	4
IV. OBJETIVO .....	5
V. PROPUESTA.....	6
IV. CAPÍTULOS .....	7
1. LA RADIACIÓN Y SUS METODOS DE DETECCIÓN.....	7
1.1. Radiactividad .....	7
1.2. Interacción de la radiación con la materia .....	9
1.3. Espectrometría gamma. ....	9
1.4. Detectores.....	12
1.5. Estado del arte .....	19
2. TEORIA Y DISEÑO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA DE DETECCIÓN .....	21
2.1. Plásticos centelladores.....	21
2.2. Fibra óptica.....	29
2.3. Fotomultiplicadores .....	35
2.4. Electrónica (preamplificador, amplificador y analizador multicanal). ....	40
2.5. Análisis de eficiencia del plástico centellador.....	45
2.6. Análisis de propagación del campo electromagnético .....	49
2.7. Perdidas por diferencias de diámetros en el acoplamiento. ....	51
3. SIMULACIÓN Y EXPERIMENTACIÓN .....	52
3.1. GENERALIDADES.....	52
3.2. Caracterización del plástico centellador .....	53
3.3. Caracterización del acoplamiento óptico plástico-guía de onda .....	68
3.4. Caracterización de la guía de onda. ....	78
4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS .....	84

4.1.	Caracterización del plástico centellador .....	84
4.2.	Caracterización del acoplamiento óptico plástico-guía de onda .....	87
4.3.	Caracterización de la guía de onda. ....	89
5.	CONCLUSIONES .....	91
V.	BIBLIOGRAFÍA.....	94

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama a bloques del sistema prototipo para medición de radiación ionizante .....	6
Figura 2. Sistema general para detector de radiación gamma de centelleo .....	6
Figura 1.1 Espectro de radiaciones .....	9
Figura 1.2 Fotón incide sobre la superficie de una material dando lugar a la emisión de un electrón [5] .....	10
Figura 1.3. Un fotón y interacciona contra el electrón libre de un átomo, efecto Compton [5].....	10
Figura 1.4. Creación de pares [5] .....	11
Figura 1.5. Espectro de emisión gama.....	11
Figura 1.6. Esquema básico del detector gaseoso .....	13
Figura 1.7. Cámara de ionización. [2].....	13
Figura 1.8. Grafica de corriente vs voltaje en una cámara de ionización [2].....	14
Figura 1.9. Amplitud del impulso o carga colectada en función de la tensión aplicada. ....	14
Figura 1.10. Definición de resolución en energía. ....	17
Figura 2.1. Sistema para detección.....	23
Figura 2.2. Niveles energéticos en una molécula de centellador orgánico.....	24
Figura 2.3. Espectro de absorción y emisión de un plástico centellador [1].....	25
Figura 2.4. Montajes de plástico centellador y tubo fotomultiplicador [3] .....	26
Figura 2.5. Grafica del progreso de la capacidad de transmisión de información por kilómetro en sistemas ópticos. ....	30
Figura 2.6. Ancho de banda para transmisión en una fibra óptica.....	31
Figura 2.7. Principio de reflexión, ley de Snell .....	31
Figura 2.8. Representación del ángulo crítico para reflexión total .....	32
Figura 2.9. Apertura numérica en una guía de onda .....	33
Figura 2.10. Perfil escalonado.....	34
Figura 2.11. Perfil gradual.....	35
Figura 2.12. Perfil escalonado monomodo.....	35
Figura 2.13. Elementos de un tubo fotomultiplicador [3].....	36
Figura 2.14. Eficiencia cuántica de materiales utilizados en el fotocátodo.....	37
Figura 2.15. Características de vidrios utilizados en fotomultiplicadores.....	37
Figura 2.16. Configuración de dinodos, caso 1 (a), caso 2 (b), caso 3 (c), caso 4 (d), caso 5 (e) y caso 6 (f).....	39
Figura 2.17. Circuitos de polarización del fotomultiplicador; a) con voltaje positivo y b) con voltaje negativo [1] .....	40
Figura 2.18. Esquema simplificado del preamplificador sensible a la corriente [30] .....	41
Figura 2.19. Esquema del preamplificador de capacitancia parasita [30] .....	41
Figura 2.20. Esquema simplificado del preamplificador sensible a carga [30] .....	42
Figura 2.21. Señal unipolar y bipolar .....	43
Figura 2.22 Señal de corte al utilizar un aamplificador polarizado.....	43
Figura 2.23. Diagrama a bloques del analizador multicanal.....	44
Figura 2.24. Esquema del detector centellador con la fuente de radiación gamma.....	45

Figura 2.25. Plástico centellador cilíndrico acoplado a un taper y guía de onda .....	45
Figura 2.26. Plástico centellador utilizado como guía de onda en forma de cono truncado acoplado a la guía de onda.....	45
Figura 2.27. Plástico centellador utilizado como guía de onda en forma de cilindro acoplado a la guía de onda .....	46
Figura 2.28. Plástico centellador en forma de cono truncado con el diferencial de un tamaño dx.....	47
Figura 2.29. Plástico centellador en forma de cono truncado.....	48
Figura 2.30. Cono truncado cambio de variable .....	48
Figura 2.31. Ensamble de la guía de onda y un acoplador o taper en forma de cilindro.....	49
Figura 2.32. Ensamble de la guía de onda y un acoplador o taper en forma de cono truncado.....	49
Figura 2.33. Perfil de Índices de refracción del ensamble de la fibra y un cilindro como detector.....	50
Figura 2.34. Perfil de Índices de refracción del ensamble de la fibra y un cono truncado como detector.....	50
Figura 2.35. Perdidas por acoplamiento de diferentes diámetros .....	51
Figura 2.36. Perdidas por acoplamiento entre el detector y la fibra.....	51
Figura 3.1. Diagrama a bloques del equipo electrónico para la experimentación .....	52
Figura 3.2. Cono con radio de salida a) $r_2=0$ y b) $r_2=r_1$ .....	53
Figura 3.3. Simulación de la ecuación de la eficiencia del plástico centellador.....	53
Figura 3.4. Plásticos centelladores utilizados para realizar la experimentación. ....	54
Figura 3.5. Espectros de los ensayos 1,3 y 5 descritos en la tabla 3.2 para la fuente de $^{137}\text{Cs}$ .....	55
Figura 3.6. Espectros de los ensayos 2, 4 y 6 descritos en la tabla 3.2 para la fuente de $^{60}\text{Co}$ .....	55
Figura 3.7. Espectro amplitud del campo eléctrico de la simulación a la entrada del taper .....	57
Figura 3.8. Espectro amplitud del campo eléctrico de la simulación a la mitad del taper.....	58
Figura 3.9. Espectro amplitud del campo eléctrico de la simulación a la salida del taper.....	58
Figura 3.10. Comparación a la salida del taper con las relaciones de área del 10% y 100%.....	59
Figura 3.11. Tapers de acrílico para experimentación.....	59
Figura 3.12. Espectro utilizando fuente de $^{137}\text{Cs}$ .....	61
Figura 3.13. Espectro utilizando fuente de $^{60}\text{Co}$ .....	61
Figura 3.14. Espectro de salida con relación del 25% y diferentes tiempos de lectura.....	62
Figura 3.15. Perfil del campo eléctrico e índice de refracción a la entrada del cono con diferentes longitudes respecto al diámetro de la entrada del cono.....	65
Figura 3.16. Perfil del campo eléctrico e índice de refracción a la salida del cono con diferentes longitudes respecto al diámetro de la entrada del cono.....	65
Figura 3.17. Tapers de acrílico para experimentación de longitud .....	66
Figura 3.18. Espectro utilizando fuente de $^{137}\text{Cs}$ .....	67
Figura 3.19. Espectro utilizando fuente de $^{60}\text{Co}$ .....	68
Figura 3.20. Plástico centellador como guía de onda en forma de cilindro acoplado a la fibra.....	68
Figura 3.21. Plástico centellador como guía de onda en forma de cono truncado acoplado a la fibra.....	68
Figura 3.22. Perfil de Índices de refracción del ensamble de la fibra y un cilindro como detector.....	69
Figura 3.23. Perfil de Índices de refracción del ensamble de la guía y un cono truncado como detector .....	69
Figura 3.24. Espectro de simulación con centellador cilíndrico acoplado (a con guía cuadrada y b con guía circular) .....	70

Figura 3.25. Espectro de simulación con centellador cónico acoplado (a con guía cuadrada y b con guía circular) .....	70
Figura 3.26. Comparación de los espectros del cilindro y cono a la entrada del taper .....	71
Figura 3.27. Comparación de los espectros del cilindro y cono a la salida del taper .....	71
Figura 3.28. Comparación de los espectros del cilindro y cono a la entrada de la fibra .....	72
Figura 3.29. Comparación de los espectros del cilindro y cono a la salida de la guía .....	72
Figura 3.30. Plásticos centelladores utilizados NE 102 .....	73
Figura 3.31. Varillas de acrílico con sección circular y cuadrada .....	73
Figura 3.32. Acoplamiento de la guía de onda con el plástico centellador .....	73
Figura 3.33. Espectro con plástico en forma de cono y cilindro utilizando la sección circular y usando $^{137}\text{Cs}$ como fuente radiactiva .....	75
Figura 3.34. Comparación de plástico en forma de cono y cilindro utilizando la sección circular y usando $^{60}\text{Co}$ como fuente radiactiva .....	75
Figura 3.35. Acoplamiento de la guía de onda cuadrada con el plástico centellador .....	76
Figura 3.36. Espectros del plástico en forma de cono y cilindro utilizando la sección cuadrada y usando $^{137}\text{Cs}$ como fuente radiactiva .....	77
Figura 3.37. Espectros del plástico en forma de cono y cilindro utilizando la sección cuadrada y usando $^{60}\text{Co}$ como fuente radiactiva .....	77
Figura 3.38. Comparación de sección cuadrada y circular utilizando el plástico en forma de cilindro y usando $^{137}\text{Cs}$ como fuente radiactiva .....	79
Figura 3.39. Comparación de sección cuadrada y circular utilizando el plástico en forma de cilindro y usando $^{60}\text{Co}$ como fuente radiactiva .....	79
Figura 3.40. Comparación de sección cuadrada y circular utilizando el plástico en forma de cono y usando $^{137}\text{Cs}$ como fuente radiactiva .....	81
Figura 3.41. Comparación de sección cuadrada y circular utilizando el plástico en forma de cono y usando $^{60}\text{Co}$ como fuente radiactiva .....	81
Figura 3.42. Comparación de sección cuadrada y circular utilizando el plástico en forma de cono y usando $^{137}\text{Cs}$ como fuente radiactiva .....	83
Figura 3.43. Comparación de sección cuadrada y circular utilizando el plástico en forma de cono y usando $^{60}\text{Co}$ como fuente radiactiva .....	83
Figura 4.1. Simulación de la eficiencia del plástico .....	84
Figura 4.2. Resultado de experimentación para caracterización de eficiencia .....	84
Figura 4.3. Sumatoria de las amplitudes del campo eléctrico a la salida del taper para cada relación. ....	85
Figura 4.4. Se grafican los totales de cada caso a la salida del taper .....	85
Figura 4.5. Resultado de experimentación para caracterización del área de salida .....	86
Figura 4.6. Sumatoria total del espectro de campo eléctrico al variar la longitud del taper .....	86
Figura 4.7. Resultado de experimentación para caracterización del área de salida .....	87
Figura 4.8. Sumatoria del espectro de campo eléctrico a lo largo del eje x con los acoplamientos simulados ...	87
Figura 4.9. Comportamiento del campo eléctrico a lo largo de los sistemas de acoplamientos simulados .....	88
Figura 4.10. Cuentas totales en experimentación del cilindro y cono acoplado a una guía de onda .....	88
Figura 4.11. Cuentas totales en experimentación del cilindro y cono acoplado a una guía de onda cuadrada. .	89
Figura 4.12. No. de cuentas totales con un plástico cilíndrico acoplado a guía de onda cuadra y circular. ....	89

<i>Figura 4.13. No. de cuentas totales con un plástico cónico acoplado a guía de onda cuadra y circular.</i> .....	90
<i>Figura 4.14. <math>\Sigma</math> de cuentas del espectro utilizando un plástico cilíndrico y una a guía de onda cuadra con diferentes longitudes.</i> .....	90
<i>Figura 5.1. Grafica de comportamiento de los experimentos con la fuente de Cobalto</i> .....	92
<i>Figura 5.2. . Grafica de comportamiento de los experimentos con la fuente de CESIO</i> .....	92

## INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.1. Tabla comparativa de fuentes radiactivas</i> .....	8
<i>Tabla 1.2. Tabla de tipos de detectores</i> .....	12
<i>Tabla 1.3. Tabla comparativa de sistemas de detección</i> .....	16
<i>Tabla 2.1. Propiedades de algunos cristales inorgánicos. Extraída y adaptada de Radiation Detection and measurement, Glenn Knoll, 4ta edición, págs. 230 y 238</i> .....	27
<i>Tabla 2.2. Tabla de características de los tipos de ventanas de fotomultiplicadores</i> .....	38
<i>Tabla 3.1. Características de las fuentes radiactiva utilizadas</i> .....	52
<i>Tabla 3.2. Ensayos de experimentación de plásticos centelladores</i> .....	54
<i>Tabla 3.3. Tabla de simulaciones realizadas con diferentes áreas de salidas</i> .....	56
<i>Tabla 3.4. Tabla de ensayos con cambio de área de salida del taper</i> .....	60
<i>Tabla 3.5. Tabla de simulación con cambio de longitud del taper</i> .....	62
<i>Tabla 3.6. Tabla de ensayos con cambio de área de salida del taper</i> .....	66
<i>Tabla 3.7. Descripción de configuración para caracterizar el acoplamiento del plástico y fibra con sección circular</i> .....	74
<i>Tabla 3.8. Descripción de configuración para caracterizar el acoplamiento del plástico y fibra con sección cuadrada</i> .....	76
<i>Tabla 3.9. Descripción de configuración para caracterizar la guía de onda utilizando el plástico en forma de cilindro</i> .....	78
<i>Tabla 3.10. Descripción de configuración para caracterizar la guía de onda utilizando el plástico en forma de cono</i> .....	80
<i>Tabla 3.11. Descripción de configuración de experimentación para caracterizar las pérdidas por propagación</i> .....	82

## LISTA DE SÍMBOLOS Y/ O NOMENCLATURA

E	Energía de una fuente
eV	Unidad de energía de una fuente radiactiva en electrón volt
$\alpha$	Radiactividad alfa
$\beta$	Radiactividad beta
$\gamma$	Radiactividad gamma
n	Índice de refracción
NA	Apertura numérica
PMT	Fotomultiplicador
NE-102	Plástico centellador distribuido por la empresa Saint-Gobain
ADC	Convertidor analógico digital
MCA	Analizador multicanal
DE	Eficiencia del detector
$^{137}\text{Cs}$	Isótopo radiactivo del cesio que se produce por fisión nuclear
$^{60}\text{Co}$	Isótopo radiactivo sintético del cobalto
OptiFDTD	Software de diseño y simulación óptica
Taper	Disminución gradual de anchura o grosor en una guía de onda.

## I. RESUMEN

La radiactividad es un fenómeno físico en el cual los núcleos de algunos elementos, llamados radiactivos, tienen la facultad de generar placas radiográficas, ionizar gases, producir fluorescencia, atravesar cuerpos opacos a la luz ordinaria, entre otros. La radiactividad se divide en natural que es manifestada por los isótopos que se encuentran en la naturaleza y la artificial que se logra con los radioisótopos producidos en transformaciones artificiales. Las radiaciones emitidas pueden ser electromagnéticas, en forma de rayos X o rayos gamma, o bien corpusculares, como pueden ser los núcleos de helio, electrones o positrones, protones u otras.

La radiactividad no es percibida por alguno de nuestros sentidos, no se puede ver, oler, escuchar o sentir. Debido a esto es necesario valerse de un medio auxiliar. En la actualidad existen dispositivos que miden la radiactividad en zonas controladas; estos dispositivos se dividen en pasivos y activos. En dispositivos pasivos, los efectos de radiación embebidos en un material sensible se registran a partir de la exposición real, mientras que en dispositivos activos los efectos de radiación se detectan inmediatamente y se registran in situ; estos últimos muchas veces cuentan con electrónica, por lo que deben tener algún tipo de protección para que no se dañe. Otra consideración es que actualmente la comunicación entre los sistemas de instrumentación y control está migrando a la optoelectrónica.

Sin embargo existen pocos sistemas remotos los que utilicen alguna guía de onda como es la fibra óptica para la comunicación, esta guía de onda funciona como medio de propagación para la realización de mediciones remotas. Por ello la investigación se centra en el análisis de un dispositivo óptico que propague la luz, desde un transductor que es el plástico centellador hasta un fotomultiplicador; esta propagación deberá tener la menor cantidad de pérdidas, por ello se busca que exista la menor cantidad de acoplamientos ópticos, además que el diseño del taper también conocido como acoplador óptico deberá tener una configuración geométrica adecuada para obtener una correcta propagación hacia la guía de onda, la cual llevará la luz hasta el fotomultiplicador.

Debido a lo anterior se desarrolló un sistema de detección utilizando un plástico centellador NE-102 como transductor de fuente radiactiva a fuente óptica, esto significa que el plástico genera luz según la cantidad de energía radiactiva que interactúe con él. Además de que se analizó el plástico centellador como taper y unido a un taper de acrílico, con el fin encontrar la mejor manera de propagar la luz hacia la guía de onda. Posteriormente se utilizó una varilla de sección cuadrada y circular de polimetilmetacrilato PMMA como guía de onda para la propagación de la señal óptica generada y llevarla a una etapa de fotomultiplicación.

En el fotomultiplicador se generan pulsos eléctricos que se acondicionan por medio de electrónica rápida, la electrónica consiste en un preamplificador y un amplificador, al tener un nivel de voltaje considerable se utiliza un convertidor analógico digital ADC, cuando los pulsos se convierten en electrónica digital se pueden procesar y mostrar en un analizador multicanal, y así obtener los espectros característicos para una fuente radiactiva.

Al finalizar la investigación de este prototipo se podría mejorar la instrumentación en plantas de irradiación, plantas nucleares e incluso hospitales debido a que el sistema de detección está diseñado para realizar mediciones remotas, ya que el fotomultiplicador se encontrará en una posición donde la energía radiactiva no represente un riesgo en su funcionamiento, debido a que el fotomultiplicador puede ser dañado por las altas energías que interactúan con él.

Además ayudará al personal operacionalmente expuesto, debido a que estará un menor tiempo en zonas controladas donde existe alta energía, con ello los operadores reducirán el tiempo de exposición y adquirirán la menor cantidad de dosis posible.

Una ventaja más, es que los dispositivos ópticos son inmunes al ruido electromagnético que pueda ser generado por el ambiente donde se encuentre lo que ayudara a tener mediciones con mayor calidad, además el mantenimiento es muy económico ya que el sistema se puede dividir por las tareas que realiza cada componente y los dispositivos ópticos que interactúan con la fuente no requieren de un alto mantenimiento. Con lo anterior posiblemente se lograría un mejor manejo de los elementos radioactivos, lo que proporcionará al ser humano una alta variedad de beneficios.

## II. ABSTRACT

Radioactivity is not perceived by any of our senses; it cannot be seen, smelled, heard or felt. Considering this, it is necessary to use an auxiliary medium. Currently, there are devices that measure radioactivity in controlled areas. These devices are divided into passive and active sensors. In passive devices the radiation effects embedded in a sensitive material are registered apart from the actual exposure, whereas in active devices the radiation effects are immediately sensed and registered in situ.

However, there are few remote systems that use a waveguide for communication, such as optical fiber. Which work as a propagation medium for the realization of remote measurements. Therefore, the research is focused on the analysis of an optical device that propagates light, from a transducer, that is the scintillator plastic, to a photomultiplier.

With this in mind, a detection system was developed using a NE-102 scintillator plastic as a radioactive source transducer to an optical source, this means that, the plastic generates light according to the amount of radioactive energy that interacts with it. Furthermore, the scintillator plastic was analyzed as taper and attached to an acrylic taper so as to find the best way to propagate the light to the waveguide. After that, two polymethylmethacrylate rods (PMMA) were used, one square and one circular, as a waveguide for the propagation of the generated optical signal and brought to a photomultiplication stage.

In the photomultiplier, electrical pulses are conditioned by fast electronics. Electronics consists of a preamplifier and amplifier. Having a considerable level of voltage, digital converter ADC is used. When the pulses are converted to digital electronic, they can process and display on a multichannel, thereby, it can display the characteristic spectra for certain radioactive source.

The aim of this research is to move the photomultiplier to a position where the radioactive energy does not represent a risk in its operation, because the photomultiplier can be damaged by the high energies that interact with it.

Besides, it will help the exposed operationally personnel, because they will stay less time in controlled areas where there is high energy and, in this way, the operators will reduce the time of exposure and they will acquire the fewest possible doses.

### III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido al criterio “Tan bajo sea razonablemente posible (As low as reasonably achievable **ALARA**)” el cual es utilizado por la Comisión Internacional de Protección Radiológica, ICRP por sus siglas en inglés (International Commission Radiologic Protection) y en los organismos reguladores de instalaciones nucleares y radiactivas, donde se busca evitar exposiciones no justificadas de personal ocupacionalmente expuesto-POE; por ello se quiere realizar el prototipo de un sistema de detección radiológica con las siguientes características:

- Capaz de detectar radiación ionizante.
- Remoto para que el personal no tenga que ser expuesto para realizar la medición.
- Baja sensibilidad a la interferencia del medio durante las mediciones.
- Que maneje señales ópticas para que en un futuro se pueda comunicar con sistemas de control que actualmente se están utilizando
- La relación costo/beneficio sea razonable para su fabricación.

Por lo anterior, el sistema debe mejorar o reemplazar algunos que actualmente existen, ya que gran parte de ellos utilizan como sistema remoto señales eléctricas las cuales deben estar adecuadamente blindadas para evitar la interferencia ocasionada por el medio.

## IV. OBJETIVO

El objetivo principal es el diseño, la elaboración, caracterización y evaluación de un sistema de medición de radiactividad ionizante suministrada por una fuente de radiación de tipo gamma.

El sistema debe ser capaz de detectar y medir la fuente de radiación, por medio de un plástico centellador, que es sensible a la radiación por los materiales con que está fabricado.

Con el análisis de los resultados experimentales se espera realizar la espectrometría de fuentes radiactivas, con ello se podrá distinguir al menos dos tipos de fuentes. A continuación se describen los objetivos secundarios.

- Objetivo 1. Caracterizar tres sistemas de medición.
  - Un plástico centellador unido directamente al fotomultiplicador
  - Un plástico centellador acoplado a una guía de onda para que posteriormente la guía se acople al fotomultiplicador. Realizando dos configuraciones con el plástico:
    - Con el plástico centellador utilizado como taper o acoplador óptico unido a la guía de onda.
    - Con el plástico centellador y un taper de acrílico acoplado a la guía de onda.
- Objetivo 2. Utilizar dos fuentes radiactivas para diferenciar los espectros, se utilizarán  $^{60}\text{Co}$  y  $^{137}\text{Cs}$ .
- Objetivo 3. Realizar la caracterización de una guía de onda plástica con sección transversal cuadrada y circular para la propagación de la señal óptica.
- Objetivo 4. Evaluar y obtener conclusiones de los tres sistemas caracterizados.

Además de realizar el objetivo de conocimiento particular, descrito a continuación.

- Objetivo 1. Se entenderá la forma en que interactúa la energía radiactiva con diversos materiales, también aprender la forma en que se debe manejar las fuentes radiactivas para que el uso sea correcto y seguro.

## V. PROPUESTA

Se propone un sistema para detección de radiación el cual tiene como transductor un plástico centellador ya que el ruido del medio afecta menos en comparación a otro tipo de transductores, este plástico se utilizará como acoplador o bien tendrá unido un acoplador de PMMA. Para realizar la propagación de la luz que resulta del acoplador, se utilizará una guía de onda plástica, ya que de igual forma el ruido del ambiente causa un menor daño en comparación a otros materiales.

Posteriormente para convertir los pulsos ópticos a eléctricos se utilizará un fotomultiplicador, en consecuencia la señal será acondicionada por medio de un preamplificador y un amplificador; al salir del amplificador se tiene una señal eléctrica con un nivel de voltaje que puede ser procesado por medio de un convertidor analógico digital, para que finalmente se utilice un analizador multicanal para examinar el espectro de cada tipo de fuente radiactiva. A continuación se muestra el diagrama a bloques del sistema.

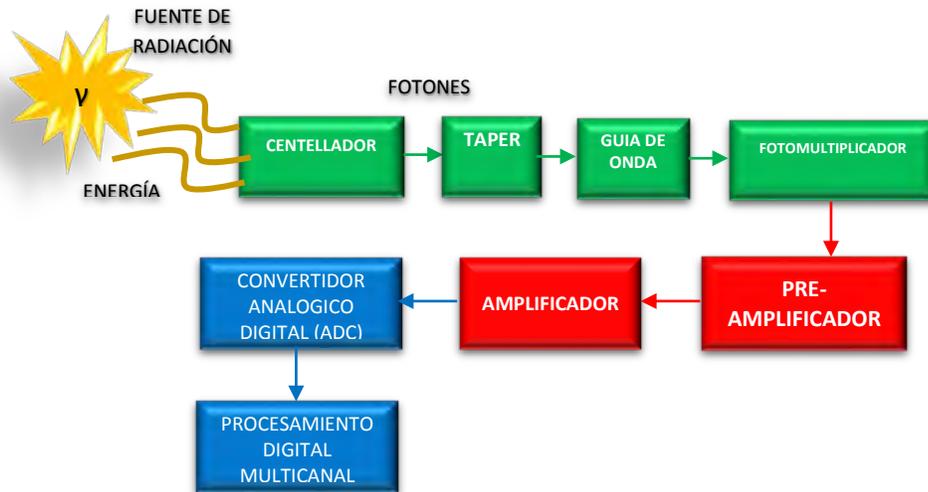


Figura 1. Diagrama a bloques del sistema prototipo para medición de radiación ionizante

Los bloques verdes indican que la señal es óptica, para los rojos la señal es eléctrica y analógica; por último los azules significan que los datos ya son procesados digitalmente.

El diagrama de la figura 2 es una forma genérica de presentar el diagrama de la figura 1, sin embargo el primero muestra de manera amplia cada etapa del sistema.

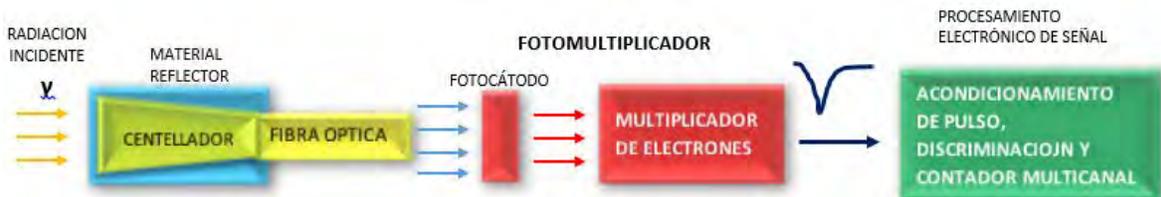


Figura 2. Sistema general para detector de radiación gamma de centelleo

Además en la figura 1 agrega la parte del taper, el cual aumentará la calidad de propagación.

## IV. CAPÍTULOS

### 1. LA RADIACIÓN Y SUS METODOS DE DETECCIÓN

#### 1.1. Radiactividad

Se dice que una radiación es ionizante cuando posee la energía necesaria para arrancar uno o varios electrones a los átomos o a las moléculas del medio irradiado, algunos tipos de radiación ionizante son  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , los rayos X y determinados rayos ultravioletas. En cambio la luz visible, la infrarroja, las microondas y las ondas radio no son ionizantes. La radiactividad tiene dos principales criterios que son la actividad y la energía descritas a continuación [1].

##### 1.1.1. Actividad

La actividad es definida como la velocidad de decaimiento de la fuente y está dada por la ley fundamental de la desintegración radiactiva, donde  $N$  es el número de desintegraciones del nucleído y  $\lambda$  es definida como la constante de decaimiento. La unidad utilizada históricamente es el Curie (Ci), definida como  $3.7 \times 10^{10}$  desintegraciones por segundo, la cual fue estimada por la actividad de un gramo puro de  $^{226}\text{Ra}$ . Sin embargo el sistema internacional de unidades adopto al Becquerel (Bq) como su unidad donde  $1 \text{ Bq} = 2.703 \times 10^{-11} \text{ Ci}$  [1].

$$\left. \frac{dN}{dt} \right]_{\text{decaimiento}} = -\lambda N . \quad (1.1)$$

Por otro lado se tiene la actividad específica para cada fuente, la cual está definida como la actividad por unidad de masa de una muestra de radioisótopo, para obtener esta actividad se ocupa la ecuación 1.2.

$$\text{actividad específica} = \frac{\text{actividad}}{\text{masa}} = \frac{\lambda N}{NM/A_v} = \frac{\lambda A_v}{M}, \quad (1.2)$$

donde,  $M$  es el peso molecular de la muestra,  $A_v$  es el número de Avogadro ( $=6.02 \times 10^{23}$  núcleos/mol) y  $\lambda$  es la constante de decaimiento del radioisótopo ( $=\ln 2/\text{vida media}$ ).

##### 1.1.2. Energía

La unidad tradicional de medición de la energía de radiación es el electrón volt (eV), definido como la energía cinética adquirida al acelerar un electrón a través de un diferencial de potencial de 1 volt. La unidad de energía en el sistema internacional es el Joule (J), cuando se tratan de energías de radiación se utiliza el femto-joule (fJ), por lo tanto la relación de conversión entre eV y J es la se muestra en la ecuación 1.3 [1].

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J} . \quad (1.3)$$

Otra manera de calcular la energía del fotón de rayo X o  $\gamma$  es utilizando la frecuencia ( $\nu$ ) y la constante de Plank ( $h=6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ; o en electrón volt,  $h=4.135 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$ ), por lo tanto la ecuación de energía se muestra en 1.4.

$$E = h\nu \quad (1.4)$$

Si bien la radiactividad es la transformación espontánea y gradual de un nucleído inestable en otro nucleído más estable, con emisión de radiación nuclear. Existen distintos tipos de radiactividad descritos a continuación.

#### 1.1.3. La radiactividad alfa ( $\alpha$ )

Es un modo particular de emisión radiactiva que tiende a llevar al nucleído a la estabilidad. Este tipo de radiaciones suelen emitirlas los elementos de número atómico elevado, tales como los de Uranio, Cerio, Radio, Plutonio, etc. Un ejemplo de desintegración alfa es la transformación de Plutonio-239 en Uranio-235. [2] [3]

#### 1.1.4. La radiactividad beta ( $\beta$ )

Corresponde a una transformación dentro del núcleo. Existen dos tipos de radiación  $\beta$ :

Decaimiento  $\beta$  (-) equivale a la transformación de un neutrón en un protón con la creación simultánea de un electrón y un antineutrino, y su posterior expulsión del núcleo. Un ejemplo de desintegración beta negativa es la transformación de Carbono-14 en Nitrógeno-14.

Decaimiento  $\beta$  (+) equivale a la transformación de un protón en un neutrón con la creación simultánea de un electrón positivo (positrón) y un neutrino. Un ejemplo de desintegración beta positiva es la transformación de Nitrógeno-12 en Carbono-12 [4].

#### 1.1.5. La radiactividad $\gamma$

Contrariamente a las anteriores ( $\alpha$  y  $\beta$ ), no está vinculada a una transmutación del núcleo, se trata de la emisión por el núcleo, de una radiación electromagnética o fotón.

Como resumen de los distintos tipos de radiación se muestra la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Tabla comparativa de fuentes radiactivas

TIPO DE RADIACIÓN	PENETRABILIDAD	CARGA	FORMA
<b>Alfa (<math>\alpha</math>)</b>	Detenidos por una hoja de papel o por unos cuantos centímetros de aire	+	Partículas cargadas
<b>Beta (<math>\beta</math>)</b>	Detenidos por varias hojas de Aluminio o hasta un metro de aire	-	Partículas cargadas
<b>Rayos <math>\gamma</math></b>	Atraviesan grandes espesores de Plomo o concreto y no pueden ser detenidos por completo	Sin Carga	Radiación electromagnética

## 1.2. Interacción de la radiación con la materia

La radiación  $\alpha$ , como ya se ha indicado, consiste en partículas de carga positiva de constitución análoga a los núcleos de Helio. Debido a su masa y a que son emitidas a gran velocidad, al atravesar la materia se frenan muy rápidamente y producen una elevada ionización. La radiación alfa queda frenada al propagarse tan sólo unos pocos centímetros en el aire o milésimas de milímetro dentro del agua. En su interacción con el cuerpo humano no son capaces de atravesar la piel.

La radiación  $\beta$ , debido a que poseen menor masa que la radiación  $\alpha$ , su penetración en la materia es mayor y provoca una menor ionización. Comparativamente, las partículas  $\beta$  de energía media se frenan en algunos metros de aire, o en 1 cm de agua. En el cuerpo humano pueden llegar a sobrepasar la piel, pero no sobrepasan el tejido subcutáneo.

La radiación  $\gamma$  es un tipo de radiación electromagnética muy energética de baja longitud de onda. Tiene un poder de penetración mucho mayor que el de las radiaciones alfa y beta y puede atravesar el cuerpo humano. Sólo con espesores de 1m de hormigón o unos pocos centímetros de plomo quedan frenadas, razón por la cual es necesario usar blindajes ante el uso de fuentes radiactivas o emisores gamma [1].

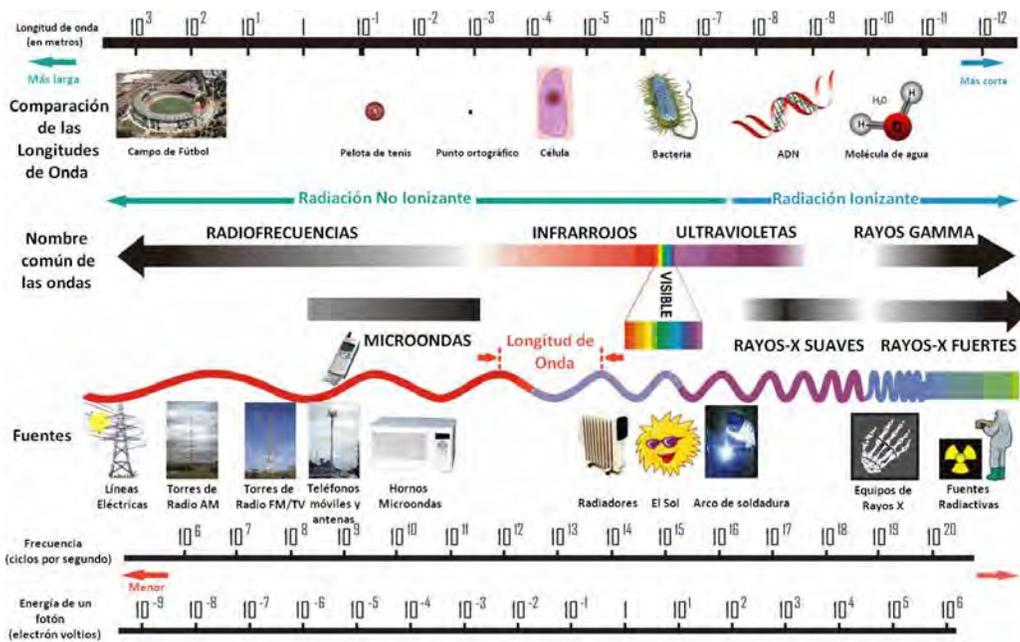


Figura 1.1 Espectro de radiaciones

## 1.3. Espectrometría gamma.

La espectrometría gamma es un método experimental utilizado para determinar la energía de radiación gamma de una determinada fuente radiactiva. La mayoría de las fuentes radiactivas emiten rayos gammas de energías características del núcleo de la fuente. La espectrometría gamma se puede utilizar para determinar la identidad del núcleo medido.

Este tipo de radiación se caracteriza por no tener carga y la detección de esta se basa en la interacción de los fotones con el material del detector, estos depositan su energía en el material

dando lugar a tres mecanismos básicos de transferencia de energía, efecto fotoeléctrico, Compton y creación de pares [1].

### 1.3.1. Efecto fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico es producido inicialmente por un fotón que incide sobre la superficie de un material (parte del detector) dando lugar a la emisión de un electrón. Es importante destacar que los electrones al ser emitidos desde la superficie del material salen con una energía cinética:

$$E = hf - w, \quad (1.5)$$

donde se representa la energía necesaria para arrancar un electrón de la superficie de material; además que  $w$  es la función trabajo,  $h$  la constante de Planck y  $f$  la frecuencia del fotón incidente. Esta depende únicamente del material [1].

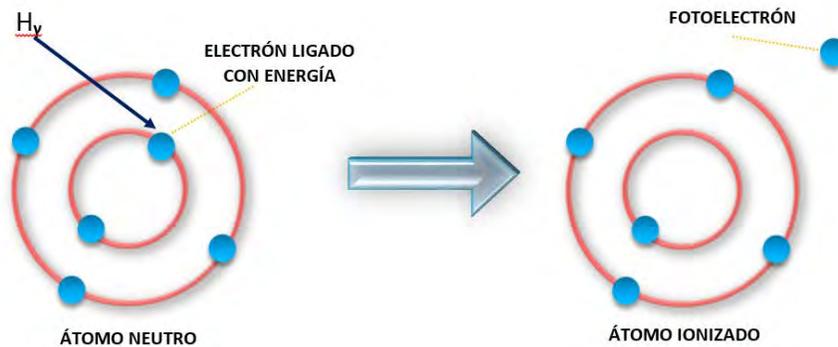


Figura 1.2 Fotón incide sobre la superficie de una material dando lugar a la emisión de un electrón [5]

### 1.3.2. Efecto Compton

Se basa en la colisión de un fotón con un electrón libre del material, dando lugar a una dispersión de la radiación electromagnética y a un aumento de la longitud de onda de esta [1].

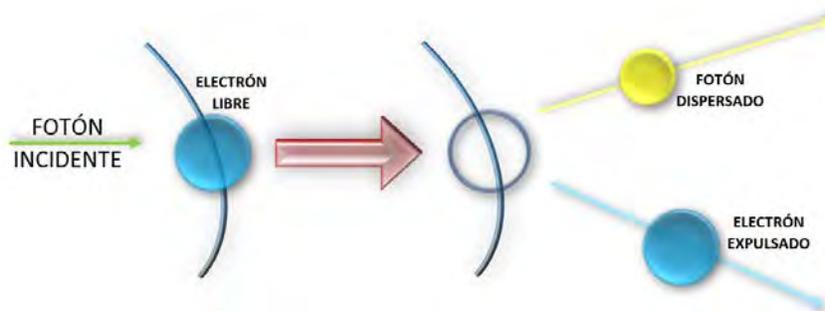


Figura 1.3. Un fotón y interacciona contra el electrón libre de un átomo, efecto Compton [5]

La nueva longitud de onda esta específicamente determinada por la dirección de dispersión de la onda electromagnética. Se puede demostrar que la variación de la longitud de onda verifica:

$$\Delta\lambda = \frac{h(1-\cos\theta)}{m_e c}, \quad (1.6)$$

donde  $h$  es la constante de Planck,  $m_e$  es la masa del electrón,  $c$  es la velocidad de la luz y  $\vartheta$  es el ángulo entre los fotones incidentes y dispersados.

### 1.3.3. Creación de pares

La creación de pares es el proceso por el cual una partícula crea dos o más partículas diferentes mediante una colisión. Esto ocurre obteniendo la creación de un positrón y un electrón mediante la colisión de un fotón con algún núcleo presente en el material del detector. En ella, el fotón, para poder crear las partículas, deberá tener como mínimo una energía igual a la masa del electrón más la del positrón [1].

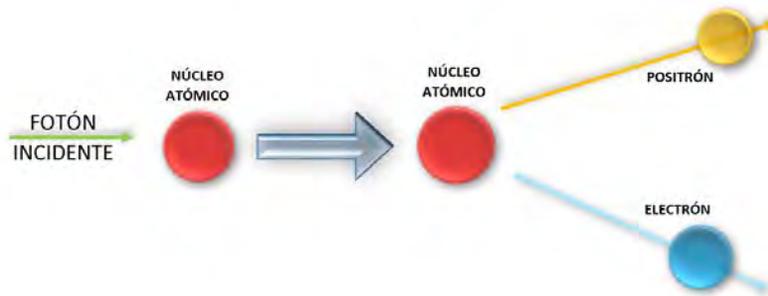


Figura 1.4. Creación de pares [5]

Con las tres interacciones se puede generar un espectro radiación, este es una gráfica de  $dN/dE$  vs  $E$ . Para el efecto fotoeléctrico se absorbe toda la energía del rayo gamma, produciendo foto electrones, luego esto produce un pico en el espectro y este corresponde a la energía del gamma que incide en el detector. Esto se muestra en la Figura 1.5.

En la interacción Compton, el gamma no es absorbido y el electrón se lleva parte de la energía, por lo tanto, la radiación deposita energía en el detector y esto da lugar en el espectro a una gran área delante del pico del fotoeléctrico. Finalmente el fenómeno de creación de pares se observa en el espectro como un pico de menor energía que el rayo gamma incidente [1].

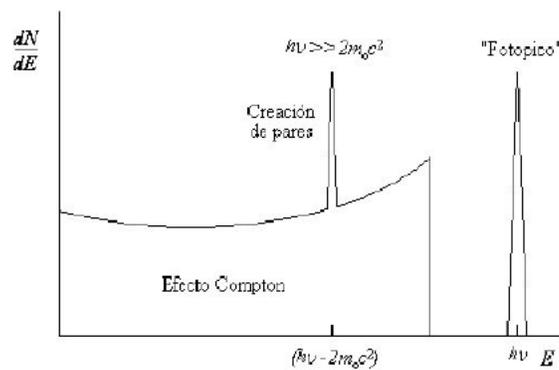


Figura 1.5. Espectro de emisión gama

## 1.4. Detectores

La radiación no es perceptible por los sentidos, por lo que es inevitable valerse de instrumentos apropiados para detectarla. Además de conocer su presencia, muchas veces interesa saber la intensidad, su energía u otra propiedad que ayude a evaluar los efectos que pueden tener sobre los materiales, organismos o el medio ambiente. Por ello, a lo largo de los años se desarrollaron muchos tipos de detectores, de los cuales algunos serán detallados a continuación. Cada clase de detector es sensible a cierto tipo de radiación y con cierto intervalo de energía. Por lo anterior, es importante seleccionar el detector adecuado al tipo y características de la radiación que se desea medir.

Los detectores de radiaciones ionizantes pueden clasificarse en inmediatos o retardados, según la información proporcionada al operador, ya sea instantánea o diferida con respecto al momento de la detección. También, se clasifican en detectores por ionización o por excitación, según el tipo de fenómeno físico involucrado en el proceso de conversión de la energía del campo en una señal perceptible. La tabla 1.2 se muestra los detectores más utilizados de acuerdo a la clasificación mencionada [2].

Tabla 1.2. Tabla de tipos de detectores.

TIPO DE DETECTOR			
INMEDIATOS		RETARDADOS	
Por ionización	Por excitación	Por ionización	Por excitación
Gaseosos y semiconductores	De centelleo	De película fotográfica	Termoluminiscentes

El diseño de los detectores es establecido por el conocimiento que se tiene de la interacción del campo radioactivo con la materia. Las radiaciones depositan cierta energía en el material, esencialmente a través de la ionización y excitación de los átomos o moléculas que lo componen. Además, puede haber emisión de luz, cambio de temperatura, o efectos químicos, que indican la presencia de radiación.

### 1.4.1. DETECTORES GASEOSOS

Los detectores gaseosos están compuestos por un espacio que contiene un gas, sometido a un campo eléctrico que es producido por una diferencia de potencial aplicado entre sus dos electrodos, normalmente un electrodo contiene al gas. Cuando el dispositivo es expuesto a un campo de radiación, las partículas ionizantes junto con el gas generan pares de iones, uno de carga eléctrica positiva y otro de carga eléctrica negativa. Estos iones son acelerados en dirección contraria a su signo de la polarización eléctrica que se obtiene del diferencial de potencial. Después de haber recorrido la distancia dentro de la cámara llegan al electrodo donde las cargas eléctricas circulan por el circuito de polarización, generando la señal eléctrica correspondiente que formara el voltaje  $v$  como se muestra en la figura 1.6, y con ello se podrá medir la cantidad de radiación que ioniza al gas [3].

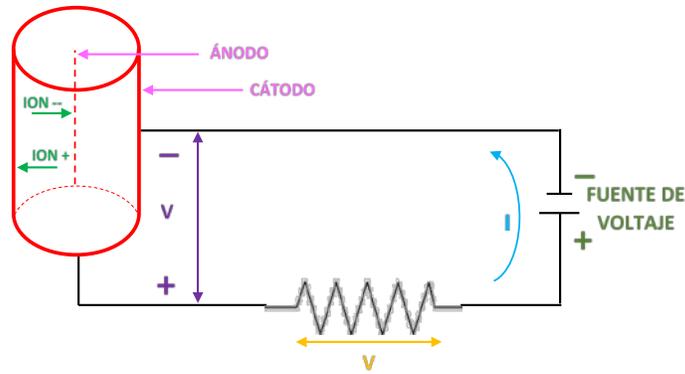


Figura 1.6. Esquema básico del detector gaseoso

#### 1.4.2. CÁMARAS DE IONIZACIÓN

Para una este tipo de detector se tiene un haz paralelo de partículas radiactivas que entran de manera constante a una cámara de gas a través de un área  $A$  con la energía  $E$  y vienen a impactar en la cámara. En la figura 1.7 existe un diferencial de potencial  $V$  aplicado a través de las placas paralelas  $P_1$  y  $P_2$  de la cámara, este diferencial genera un campo eléctrico uniforme entre ellas. Si la intensidad del campo eléctrico proporcional a  $V$ , es relativamente débil, sólo unos pocos pares de iones totales irán a la zona de influencia, lo que formara una pequeña corriente que fluirá en el circuito. La mayoría de los otros pares de iones forman átomos de gas neutros. Para la gráfica de la figura 1.8, la corriente  $I$  aumenta mediante el crecimiento de  $V$  hasta un valor  $V_0$ , es entonces que el campo se vuelve lo suficientemente fuerte como para recoger todos los pares de iones producidos por la radiación incidente y sus electrones secundarios. Posterior a este voltaje  $V_0$ , la corriente se mantiene en una meseta en su valor de saturación  $I_0$  cuando  $V > V_0$  [2].

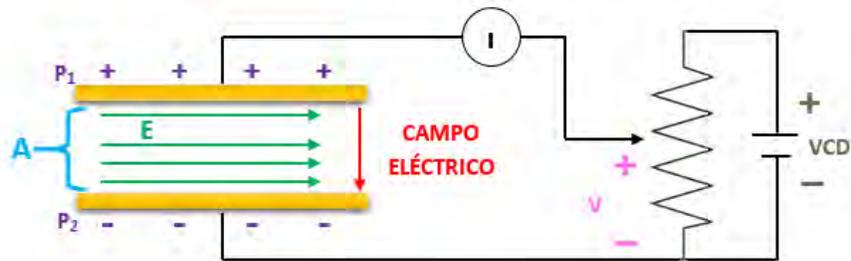


Figura 1.7. Cámara de ionización. [2]

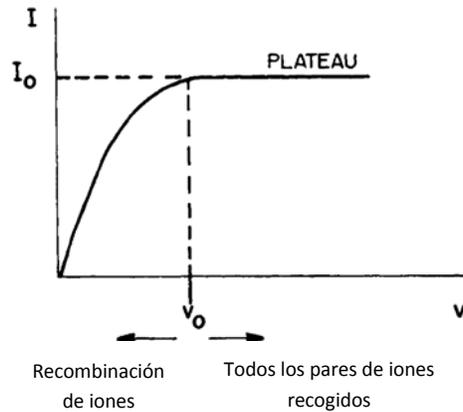


Figura 1.8. Grafica de corriente vs voltaje en una cámara de ionización [2]

#### 1.4.3. CONTADORES GEIGER-MÜLLER

Si se continúa incrementando la diferencia de potencial entre electrodos del detector gaseoso más allá de los valores del rango de funcionamiento como contador proporcional, se produce un factor de multiplicación de iones que deja de ser lineal con la tensión aplicada. Debido a que la masa de iones positivos es mucho mayor que la de los electrones, estos iones se desplazan a menor velocidad, llegando a formar una carga espacial que altera la forma del campo eléctrico dentro del detector y con ello la linealidad. Si se sigue aumentando más la diferencia de potencial, el efecto de la carga espacial resulta dominante frente a la diferencia de potencial exterior.

Cuando se incrementa aún más esa diferencia de potencial en la cámara, el tubo opera con proporcionalidad limitada, si todavía se provee un voltaje más alto, se ingresa en la región Geiger-Mueller (GM). En esta última región, el campo cercano al ánodo es tan fuerte que cualquier ionización inicial genera en el gas un pulso, el tamaño depende del número de pares de iones iniciales. Con un aumento en la tensión, el campo finalmente se convierte en átomos de gas ionizado y el tubo se descarga continuamente. Cuando se tiene una partícula alfa, la curva de altura del pulso para una partícula beta es similar, pero más bajo, como muestra la figura 1.9 donde  $E_1 < E_2$ . Sin embargo las dos curvas se unen en la zona Geiger Muller [1, 2].

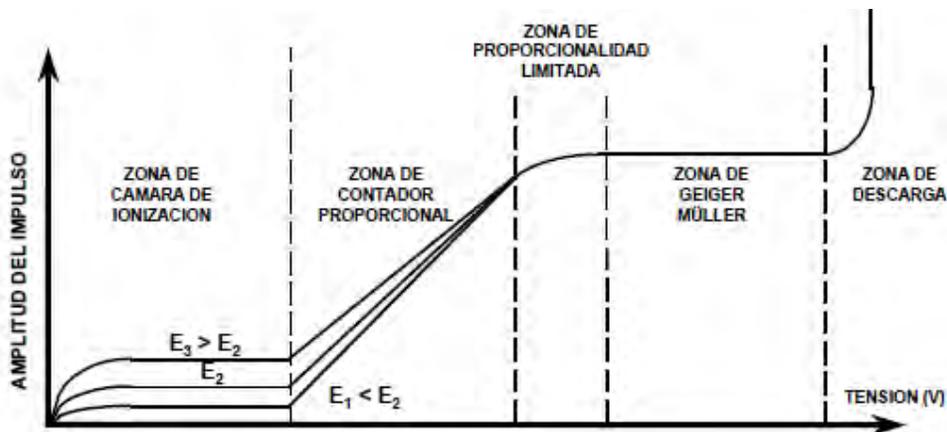


Figura 1.9. Amplitud del impulso o carga colectada en función de la tensión aplicada.

#### 1.4.4. DETECTORES SEMICONDUCTORES

El principio de funcionamiento de los detectores semiconductores se asemeja al de la cámara de ionización, donde el medio ionizable cambia de un gas a un semiconductor (*Ge* o *Si*) de alta resistividad. La alta resistividad existe por la creación de zonas del material exentas de portadores libres conocidas como zonas de carga espacial, las que se logran mediante métodos que son característicos de los semiconductores, los detectores tienen ciertas ventajas como son:

- La densidad del medio ionizado es alta; esto significa que cuenta con una formidable eficiencia de detección por unidad de volumen efectiva del detector.
- La energía mínima para generar un par de portadores de carga en los semiconductores es alrededor de 10 veces menor que en los gases, y 100 veces menor que en un centellador. Lo que significa que para una misma energía impartida, la cantidad de pulsos producidos es mucho mayor en los semiconductores que en gases o centelladores, lo que representa tener menores fluctuaciones estadísticas, y con ello una excelente resolución.
- El movimiento de los electrones y huecos es elevada, además de que el volumen efectivo del medio detector es pequeño; lo anterior se convierte en un tiempo de recolección de cargas muy breve, del orden aproximado del nano segundo, y con ello una elevada resolución en tiempo.
- Pueden realizarse detectores muy delgados de manera que absorban una fracción de la energía de las partículas incidentes, a fin de medir su ionización específica ( $dE/dx$ ).

Sin embargo tienen ciertos inconvenientes tecnológicos descritos a continuación:

- Debido a su alta conductividad en comparación con la cámara de gases, se tiene un ruido que tiende a enmascarar la medición de partículas ionizantes de muy baja energía.
- Tiene defectos en su estructura cristalina, como son las vacancias y dislocaciones, producen recombinación de los portadores lo que genera tener pérdida de algunos de ellos, y a su vez resta eficiencia de detección [1, 2, 3].

#### 1.4.5. DETECTORES TERMOLUMINISCENTES

Los detectores termoluminiscentes conocidos con sus siglas en inglés *TLD* (thermoluminescent dosimeters) son detectores pasivos e integradores lo que permite obtener la y discriminar las componentes de distintos campos de radiación. El fundamento de su funcionamiento se basa en el fenómeno de luminiscencia [1, 2].

Este fenómeno es el proceso de emisión de radiación óptica de un material por causas no térmicas, que se presenta en ciertas sustancias dieléctricas o semiconductoras en determinadas condiciones de excitación. Los medios de excitación en la luminiscencia son diversos, algunos ejemplos son:

- Fotoluminiscencia producida por la interacción de fotones ópticos (ultravioletas, visible, infrarrojo).
- Triboluminiscencia originada por movimientos mecánicos.
- Quimioluminiscencia debida a la entrega a la red de energía que surge de las reacciones químicas.

- Electroluminiscencia originada por la energía transmitida por un campo eléctrico.

Para finalizar se presenta la tabla 1.3 donde se comparan los principales sistemas de detección, además del efecto físico utilizado, también los distintos tipos y detectores que existen.

Tabla 1.3. Tabla comparativa de sistemas de detección.

SISTEMAS DE DETECCIÓN		
Efecto	Tipo de instrumento	Detector
Eléctrico	➤ Cámara de ionización	➤ Gas
	➤ Contador proporcional	➤ Gas
	➤ Contador Geiger-Mueller	➤ Gas
	➤ Estado sólido	➤ Semiconductor
Químico	➤ Película	➤ Emulsión fotográfica
	➤ Dosímetro químico	➤ Sólido o líquido
Luz	➤ Contador de centelleo	➤ Cristal o líquido
	➤ Contador Cherenkov	➤ Cristal o líquido
Termo luminiscencia	Dosímetro termo luminiscente	Cristal
Calor	Calorímetro	Sólido o líquido

#### 1.4.6.Sensibilidad

La sensibilidad del detector se refiere a la capacidad de producir una señal útil para detectar un tipo de radiación en un determinado rango de energía. Fuera de estos rangos, la señal es inusable o decrece notoriamente.

La sensibilidad depende de ciertos factores como la sección eficaz de interacción entre el campo radiactivo y el material del detector, la masa del detector y el ruido electrónico intrínseco del mismo. La sección eficaz y la masa del material detector establecen la probabilidad de que la radiación incidente transfiera cierta cantidad de su energía al material. En el caso de partículas neutras, como la radiación gamma  $\lambda$ , la sección eficaz de interacción son pequeñas, por lo cual la densidad y el volumen del detector son un factor primordial para obtener una buena señal, lo que significa un mayor tamaño ya que de lo contrario el detector se vuelve transparente a la radiación incidente. El ruido electrónico intrínseco del detector determina el umbral inferior de detección, debido a que dicho ruido absorbería la señal de la detección para energías bajas.

#### 1.4.7.Respuesta del detector

Además de detectar la presencia de radiación, muchos detectores son capaces de proveer información acerca de la energía de la misma. Esto se debe a que el número de ionizaciones realizadas en el detector es proporcional a la energía suministrada por la radiación incidente en el volumen del dispositivo. Si el material sensible del detector tiene un volumen y densidad tal que la

radiación incidente es totalmente absorbida, entonces esa cantidad de ionizaciones producidas es una medida directa de la energía de la radiación incidente.

Normalmente, la información provista por una unidad detectora es un pulso de corriente. Así que la cantidad de ionizaciones está reflejada en la carga eléctrica contenida en la señal, por ejemplo se obtiene la integral del pulso respecto del tiempo. Esta integral corresponde a la amplitud o altura del pulso de la señal. La relación entre la energía de la radiación y la integral del pulso de la señal de salida es llamada respuesta del detector. Idealmente es deseable que la respuesta del detector sea lineal, al menos en un rango de energías, esto facilita la conversión para obtener la energía depositada. La función de respuesta del detector a una entrada de energía queda determinada por las distintas interacciones que pueden tener lugar entre la radiación y el material detector.

#### 1.4.8. Tiempo de respuesta

Una de las características más importante de un detector es el tiempo de respuesta, que es definido como el tiempo que toma un detector para formar una señal posterior a la llegada de la radiación incidente. En este período, existe la posibilidad de no registrar un segundo evento o que se sume una segunda señal en la primera, generando una altura de pulso que no se corresponde con la energía de la radiación incidente. Este proceso se conoce como tiempo muerto del detector y limitan la cantidad de eventos detectados por unidad de tiempo por el detector [1].

#### 1.4.9. Resolución en energía

En detectores diseñados para determinar la energía de un tipo de radiación incidente, el punto más importante es la resolución en energía; que es la capacidad de distinguir entre dos radiaciones de energías próximas. Normalmente, la resolución se mide exponiendo el detector a una radiación mono energética de energía  $E$  y observar el espectro resultante. Idealmente, se espera obtener un pico delgado centrado en  $E$  tipo función delta de Dirac. El resultado es un pico con un ancho finito y de forma Gaussiana; este ancho finito aparece por fluctuaciones estadísticas en el número de excitaciones e ionizaciones que se producen en la masa del detector [1].

La resolución del detector se determina por el ancho en la mitad de la altura del pico. Por ello señales de energías separadas por un valor mayor a este ancho, se podrán identificar. Donde FWHM es el ancho a mitad de altura del pico y  $H_0$  la energía, la resolución relativa se muestra en la figura 1.10.

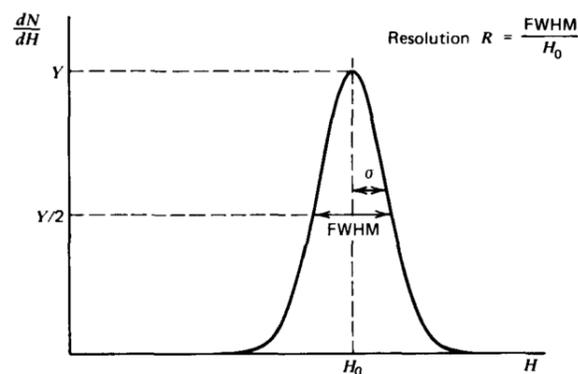


Figura 1.10. Definición de resolución en energía.

#### 1.4.10. Eficiencia del detector

Para determinaciones cuantitativas de la actividad debe ocuparse la eficiencia absoluta. También conocida como eficiencia total, se define como la fracción de eventos emitidos por la fuente que son registrados por el detector, ecuación 1.7 [1].

$$\varepsilon_{TOTAL} = \frac{\text{eventos registrados}}{\text{eventos emitidos por la fuente}} . \quad (1.7)$$

La eficiencia dada en función de la geometría del detector y la probabilidad de interacción en el volumen sensible de dicho detector, se puede factorizar en dos términos, la eficiencia intrínseca ( $\varepsilon_{int}$ ) y la eficiencia geométrica ( $\varepsilon_{geom}$ ) de modo que la eficiencia total  $\varepsilon_{total}$  se describe en la ecuación 1.8.

$$\varepsilon = \varepsilon_{int} \varepsilon_{geom} , \quad (1.8)$$

donde, la eficiencia intrínseca  $\varepsilon_{int}$ , es la fracción de eventos incidentes que son registrados por el detector y la ecuación 1.9 muestra la operación para obtener dicha eficiencia.

$$\varepsilon_{int} = \frac{\text{eventos registrados}}{\text{eventos incidentes sobre el detector}} \quad (1.9)$$

Por lo tanto la eficiencia intrínseca depende sólo de la sección eficaz de interacción entre la radiación incidente y el medio detector. Por otro lado, la eficiencia geométrica  $\varepsilon_{geom}$  es la fracción de eventos que inciden sobre el detector y depende enteramente de la configuración geométrica del detector y la fuente radiactiva.

## 1.5. Estado del arte

La investigación sobre sistemas de detección utilizando la tecnología del centelleo tuvo su primer uso en un experimento de 1903, en el que William Crooks visualizó el fenómeno en una pantalla de sulfuro de zinc golpeada por partículas alfa; este centelleo generado en la pantalla era visible para el ojo desnudo sin necesidad de algún microscopio o una sala oscura. Con la utilización de esta técnica se tuvieron importantes descubrimientos sin embargo era cansada y no se tenía algún instrumento de comparación o bien un transductor. La técnica volvió a ganar interés en 1944 cuando Curran y Baker sustituyeron el ojo por el recién inventado fotomultiplicador y con ello el nacimiento del detector centellador moderno.

Esta técnica fue utilizada para diversos sistemas de instrumentación, lo único modificado fue el material con que se fabricaba el plástico centellador, además de la adquisición de los electrones generados por el fotomultiplicador; por ejemplo en 1960 se realizó la investigación *“The response of plastic scintillators to high-energy particles”* [6], donde la experimentación se basó en obtener la respuesta de un cilindro de material NE-102 con energías mayores a 160 MeV, este plástico fue acoplado directo a un PMT.

Para el año de 1976 se seguía obteniendo experimentación de la respuesta de plásticos centelladores como lo realizó en *“Response of plastic scintillator detectors to heavy ions,  $Z \leq 35$ ,  $E \leq 170$  MeV”* [7], esta investigación de igual manera se realiza con energías altas con valores en MeV, y el plástico esta acoplado directo al fotomultiplicador. Para la década de los 90 se siguió utilizando esta técnica con energías menores para realizar diversas instrumentaciones que fueron aplicadas en distintas investigaciones por ejemplo *“Measurement of the absolute neutron efficiency for a NE-102A scintillator in the energy range 2-7 MeV using the associated particle technique”* [8], o bien *“The response of plastic scintillator to protons and deuterons”* [9].

Para la década de los 80 y 90 se tuvo un avance en la imagenología médica, donde materiales centelladores tuvieron una gran importancia en el desarrollo de este tipo de instrumentación como lo describe el artículo *“Inorganic scintillators in medical imaging”* [10] aunque los acoplamientos seguían siendo directos al transductor.

Además se ha utilizado software de simulación como lo es el Monte Carlo, y se han comprado con resultados obtenidos experimentalmente como lo mostrado en el artículo *“Determinación de la Respuesta de un Detector de NaI(Tl)”* [11], *“Validation of a NaI(Tl) detector’s model developed with MCNPX code”* [12], otro artículo más que se validó con simulación fue el realizado en la investigación *“Modelling plastic scintillator response to gamma rays using light transport incorporated FLUKA code”* [13] o bien el artículo *“Position Sensitive detection system for charged particles”* [14] en el cual un sistema es capaz de detectar en un plano xy una partícula cargada. De igual forma se puede enumerar más artículos donde se utilizó la técnica del centelleo pero se sigue acoplando directamente el fotomultiplicador como lo es *“Characterization of the ACORDE scintillator counters using a PCI electronic card”* [15], en el cual se utiliza un software de adquisición y procesamiento para generar los espectros obtenidos por el acoplamiento de 120 centelladores; uno más es

*“Working out the position resolution on large scintillating detectors, through the (light attenuation method)”* [16], para este se utiliza la técnica del centelleo para obtener los espectros de energías de neutrones para dos dimensiones utilizando el método de atenuación de la luz.

Además se investigó la forma en que afecta al espectro el tamaño del plástico centellador, como fue presentado en el artículo *“The Effect of Detector Dimensions on the NaI(Tl) Detector Response Function”* [17], en el cual se analizaron 3 tamaños de plásticos centelladores con tres diferentes fuentes y se compararon los resultados con los simulados en Monte Carlo donde los espectros obtenidos experimentalmente fueron muy parecidos en forma.

Ahora se consultaron los trabajos que comenzaron a utilizar la técnica del acoplamiento del material centellador con una fibra óptica; el primero de ellos es un trabajo muy interesante donde se expone un concepto de medición de radiación de forma remota en tiempo real con la utilización de la fibra óptica como medio de transmisión el nombre del artículo es *“Real-time fibre optic radiation dosimeters for nuclear environment monitoring around thermonuclear reactors”* [18], si bien en este trabajo se acopló la fibra se utilizó la técnica **optically stimulated luminescence OSL** obteniendo muy buenos resultados. Además se comenzó a utilizar la fibra óptica para desarrollar sistemas de bajo tamaño capaces de generar la espectrometría de fuentes radiactivas como el artículo *“Development of a Small-Sized, Flexible, and Insertable Fiber-Optic Radiation Sensor for Gamma-Ray Spectroscopy”* [19], sin embargo este presenta los resultados sin realizar un análisis de acoplamiento, aunque de igual forma los resultados obtenidos son buenos. Teniendo investigaciones que utilizan la técnica de la fibra óptica como medio de propagación se realizó un trabajo para analizar los efectos que causan algunas variables como lo presentado en el artículo *“Effects of Temperature and X-rays on Plastic Scintillating Fiber and Infrared Optical Fiber”* [20], para este artículo se experimentó con dos variables las cuales fueron los rayos x y la temperatura obteniendo resultados concretos. Existen una investigación que analizó las pérdidas de producción de luz que sufre un plástico centellador al ser irradiado con cierta energía, esta investigación es *“Test of a Fiber Optic Scintillation Dosimeter with BGO Tip in a <sup>60</sup>Co Irradiation Chamber”* [21]

Si bien todas las investigaciones ocupaban a la fibra óptica como medio de transmisión, en el siguiente se utilizó la fibra como transductor el cual mide la Cherenkov y fue comparado con otro sistema que utiliza el plástico centellador como transductor; el artículo lleva por nombre *“Fiber-optic Cherenkov radiation sensor for proton therapy dosimetry”* [22], con el avance de investigaciones que ocupan la fibra óptica como transductor se comenzó a detectar remotamente en áreas de difícil acceso como una piscina de combustible gastado, esta investigación se realizó en el artículo *“Evaluation of the Detection Efficiency of LYSO Scintillator in the Fiber-Optic Radiation Sensor”* [23]. De igual manera que en el plástico centellador, una investigación analizó las pérdidas sufridas en la fibra óptica centelladora por la irradiación que tiene, esta publicación es *“Real-time gamma dosimetry using PMMA optical fibres for applications in the sterilization industry”* [24].

## 2. TEORIA Y DISEÑO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA DE DETECCIÓN

### 2.1. Plásticos centelladores

#### 2.1.1. Introducción

Los detectores centelladores usan ciertos materiales, que cuando son expuestos a radiación ionizante, emiten un pequeño destello de luz, este fenómeno es conocido como centelleo. El proceso al igual que la mayoría de detectores ocurre cuando la radiación interactúa con la materia, excitando e ionizando un gran número de átomos y moléculas, cuando estas últimas vuelven a su estado fundamental, se desexcitan y con ello emiten fotones con un rango de energía en el espectro visible o en los alrededores de él. La mayoría de materiales transparentes producen un pequeño centelleo cuando sobre ellos incide radiación ionizante. Aunque, en pocos la conversión de energía de excitación a luz es eficiente, a estos materiales que logran la conversión se conocen como centelladores. Para estos, se distinguen dos procesos de emisión de luz, la fluorescencia y fosforescencia.

Primero, la fluorescencia es un proceso instantáneo, si se toma una escala de tiempos de transiciones atómicas. Ya que este fenómeno ocurre con una emisión de luz en el orden de los 10 milisegundos después de la interacción de la radiación con el material. En cambio para la emisión retardada en el proceso se le conoce como fosforescencia. Este retardo, se genera porque la excitación de la radiación incidente da lugar a un estado meta estable, el cual puede durar minutos o incluso ciertas horas, esto dependerá del material. Todo detector centellador cuenta con el material centellador como su primer transductor, este transforma la radiación ionizante en fotones visibles. Entonces se debe obtener información útil para ello se adiciona un foto detector, que convierte la luz que se generó del centelleo en una señal eléctrica. El foto detector que se utiliza regularmente es el tubo fotomultiplicador PMT, de sus siglas en inglés, *pho-tomultiplier tube*. En la actualidad, la tecnología de semiconductores permitió el desarrollo de fotodiodos quienes reemplazan adecuadamente a los PMT [1, 2].

#### 2.1.2. Detectores de centelleo

Para los detectores de centelleo es vital aprovechar el hecho de que la radiación produce pequeños destellos de luz al interactuar con ciertos materiales. Dicha luz se recoge y convierte en un pulso eléctrico. La detección de radiación por detectores de centelleo es una de las técnicas más antiguas y útiles para la determinación de espectros de una gran variedad de radiaciones.

Los centelladores cuentan con cristales que tienen la propiedad conocida como luminiscencia. Cuando los materiales luminiscentes son expuestos a ciertas formas de energía como luz, calor y radiaciones; la energía se absorbe y la cambian en forma de luz. Cuando la nueva forma de radiación ocurre inmediatamente después de la absorción, en el rango de  $10^{-8}$  s después de ésta, el proceso se denomina fluorescencia. Por el contrario, si la respuesta se retarda, el proceso se conoce como fosforescencia, para este caso puede durar desde unos microsegundos hasta horas, dependiendo del material. Además el detector debe contar con un segundo componente en el sistema de detección, que se conoce como fotomultiplicador. Se tiene un fotocátodo donde incide la luz emitida por el cristal centellador, este haz luminoso emite electrones debido al efecto fotoeléctrico.

Por ende, la radiación incidente se convierte primero en destellos de luz y posterior en electrones, dicho de otra forma en un pulso eléctrico.

Aunque existe una gran cantidad de materiales centelladores, no todos son usados como detectores. Normalmente, un buen detector centellador cumple las siguientes condiciones: [1, 4]

1. Excelente eficiencia para transformar la energía cinética de la radiación ionizante en fotones luminosos de una longitud de onda apropiada para ser captados por el tubo fotomultiplicador.
2. La conversión de energía cinética en el espectro de fotones debe ser lineal, es decir, la luz producida debe ser proporcional a la energía depositada en el cristal dentro de un intervalo grande de energías.
3. El cristal o material de centelleo debe ser transparente a la longitud de onda de la emisión para poder obtener una buena colección de luz.
4. El tiempo de decaimiento de la fluorescencia debe ser muy corto para que se generen pulsos de corta duración.
5. El material centellador debe tener buenas cualidades ópticas, para que pueda propagar la luz.
6. SE deberá obtener cristales de gran tamaño para utilizarse como detectores directos.
7. El índice de refracción debe ser muy cercano al del vidrio con  $n \approx 1.5$ , para lograr un acoplamiento eficiente entre el cristal y el tubo foto multiplicador.

Sin embargo no todos los materiales satisfacen todos los criterios en forma simultánea, por ende la elección de uno de ellos debe ser acompañada de la evaluación de otros factores. Actualmente existen seis tipos de materiales usados como detectores: cristales orgánicos, líquidos orgánicos, plásticos, cristales inorgánicos, gases y vidrios.

Uno de los materiales que más se emplea en la detección es el ioduro de sodio dopado con talio,  $NaI(Tl)$ , otro material que de igual forma se utiliza bastante es el fluoruro de bario  $BaF_2$ . Para la detección de neutrones se suele emplear materiales orgánicos plásticos, donde los más importantes son el antraceno y el estilbena. Y para algunas aplicaciones en bioquímica y medioambiente se utilizan los centelladores líquidos orgánicos.

Para los detectores de centelleo sólidos, el mecanismo de centelleo parte del análisis de la estructura de bandas electrónicas del material. Cuando la radiación ingresa al cristal se provocan dos tipos de procesos, la ionización del cristal por excitación de un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción, con ello se crea un electrón libre y un hueco o bien la promoción de un electrón a la banda de excitación, localizada por debajo de la banda de conducción. Para este estado, el electrón y el hueco permanecen ligados como un par que será capaz de moverse libremente a través del cristal. Si en el cristal existen impurezas, se crearan niveles electrónicos en la banda prohibida por ello, un hueco pueden encontrar en su migración uno de estos sitios de impurezas, y por ende ionizarlo. Entonces un electrón podrá ingresar en un hueco, generando una transición desde el nivel excitado, y se emitirá radiación si el modo de des excitación está permitido [1].

Para la figura 2.1 se proporciona el esquema de un detector centellador acoplado al fotomultiplicador. La partícula radiactiva a detectar interactúa con el material centellador y deja parte de su energía en este, una porción de la cual se transforma en fotones visibles. Los fotones son dirigidos hasta llegar al fotocátodo del fotomultiplicador. Los fotoelectrones generados por el

fotocátodo se multiplican en un orden de un millón de veces en el multiplicador de electrones del tubo fotomultiplicador, dando lugar a un pulso de corriente. Esta corriente tiene una carga típica por lo que se genera una tensión del orden de decenas de mV, se procesará electrónicamente con el afán de conseguir información acerca de la radiación incidente.



Figura 2.1. Sistema para detección

Para entender el comportamiento, se resume el funcionamiento del detector sintéticamente en los siguientes eventos [1, 4]:

1. La radiación ionizante interactúa con el material centellador, transfiriendo parte de su energía como ionización y excitación.
2. Parte de esa energía absorbida es liberada en forma de luz visible, a través de los mecanismos de centelleo.
3. Mediante guías de luz, se propaga hacia el fotodetector. Donde el fotocátodo del fotomultiplicador absorbe los fotones y emite fotoelectrones.
4. El arreglo multiplicador de electrones magnifica los electrones incidentes en el orden de  $10^6$ , para su procesamiento posterior.
5. La corriente eléctrica de salida del fotomultiplicador es procesada electrónicamente, primero en una etapa analógica, y luego en otra digital.
6. Los materiales centelladores se pueden dividir en dos categorías: materiales orgánicos e inorgánicos.

### 2.1.3. Centelladores orgánicos

#### 2.1.3.1. Generalidades

Los detectores orgánicos están hechos de un material centellador, llamado en forma coloquial flúor debido a que este es el responsable de la fluorescencia, disuelto en un solvente base. Los centelladores más frecuentes se encuentran en soluciones líquidas o en matrices poliméricas, dando lugar a los centelladores líquidos y a los centelladores plásticos, respectivamente.

Los compuestos centelladores son hidrocarburos aromáticos, es decir, compuestos contienen átomos de carbono ligados entre sí en forma de anillo. Entre los más extensamente utilizados podemos mencionar a *PTP*, *B-PBD*, *PPO* y *POPOP*. Sus fórmulas químicas son, respectivamente,  $C_{18}H_{14}$ ,  $C_{24}H_{22}N_2O$ ,  $C_{15}H_{11}NO$  y  $C_{24}H_{16}N_2O_2$ , es decir que son materiales ricos en carbono y en hidrógeno, cuyo número atómico promedio está entre 3.5 y 5.

Los materiales centelladores se conforman como mezcla de dos de estos compuestos, en donde uno de ellos es el centellador primario y el otro desplaza la longitud de onda. El primero, del orden de

20 veces más concentrado que el segundo, posee emisión en el espectro UV (300-370 nm). El segundo, absorbe los fotones UV y los remite en longitudes de onda más largas, lo cual puede ser deseable, para ajustar los fotones con la respuesta espectral del fotocátodo y para disminuir la absorción de estos fotones por el mismo centellador [3, 4].

### 2.1.3.2. Mecanismo de centelleo

Los compuesto de los centelladores orgánicos poseen orbitales moleculares, en los cuales los electrones no se encuentran asociados a un átomo en particular, sino que están relocalizados en la molécula. Estos orbitales son los que generan los enlaces químicos entre los átomos de carbono que forman el anillo característico de estos compuestos. La luz de centelleo se genera por transiciones entre niveles energéticos de electrones de valencia. En la figura 2.2 se puede ver un diagrama de energías esquemático, donde hemos graficado el estado fundamental, un estado excitado singlete de spin  $S_1$  y otro triplete  $T_1$ . El fundamental es un estado singlete y lo notamos  $S_0$ .

También, para cada nivel electrónico hay una estructura de subniveles energéticos de excitaciones de modos vibraciones moleculares. La diferencia de energía entre niveles electrónicos está en el orden de los 3 eV, mientras que entre los subniveles vibraciones, en el orden de los 0.15 eV.

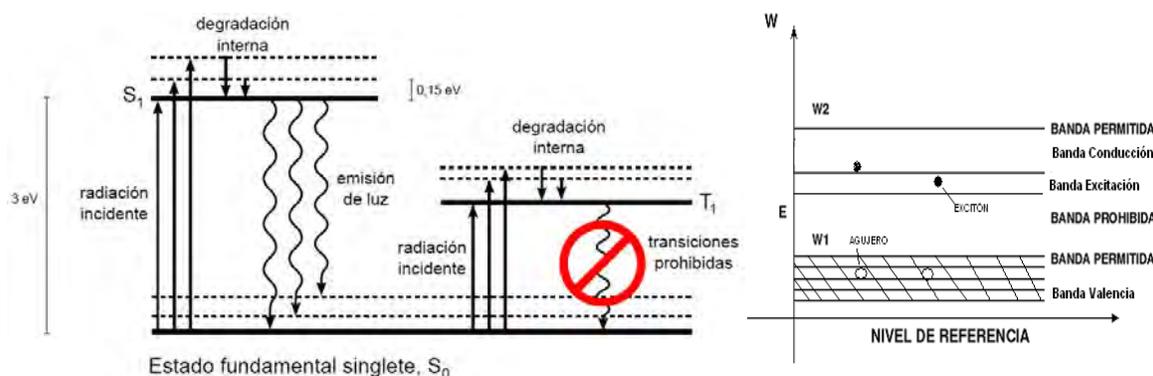


Figura 2.2. Niveles energéticos en una molécula de centellador orgánico

Proceso que deja una molécula en el estado  $S_1$ , que luego decae a emitiendo radiación con el proceso antes descrito. Esta luz se emite con un cierto retardo, el cual es característico de la interacción entre moléculas excitadas, y representa la componente lenta o retardada del centelleo: la fosforescencia. La contribución de esta componente a la luz total no es significativa, salvo para ciertos materiales orgánicos. Una característica remarcable de estos procesos es su rapidez, con tiempos de decaimiento en el orden de unos pocos nanosegundos o menos. Por otro lado, debido a la naturaleza molecular de la luminiscencia de estos materiales, los centelladores orgánicos pueden ser utilizados en numerosas formas sin perder sus propiedades.

### 2.1.4. Centelladores líquidos

Los centelladores líquidos son soluciones de material centellador en un solvente líquido. Los solventes más utilizados son xileno, tolueno, benceno, fenilciclohexano, trietilbenceno y decalina. La concentración del material centellador primario esta entre 2 y 4 gramos por litro de solvente. El mecanismo de centelleo, el tiempo de respuesta de los centelladores líquidos es corto, en el orden

de unos pocos nanosegundos o menos. Otra característica destacable es su bajo costo respecto a otros centelladores. Por ello, los centelladores líquidos son frecuentemente utilizados en aplicaciones que requieren grandes volúmenes, una desventaja que tiene es que se debe contener en un volumen cerrado pero para la propagación requiere una pared con un índice de refracción que sea adecuado para transmitir [3].

#### 2.1.5. Centelladores plásticos

Los centelladores plásticos corresponden al tipo más utilizados en física nuclear y de altas energías. Estos constan de una matriz polimérica, esto se general al tener un plástico base con un material centellador disuelto. En su proceso de fabricación, el material centellador primario se disuelve en el solvente precursor para luego polimerizar la solución, dando lugar al plástico con el centellador disperso en forma homogénea. Los plásticos base más utilizados son el poliestireno, utilizado para hacer las cajitas de CDs, los cubiertos plásticos y los vasos desechables, otra base es el polimetilmetacrilato, mejor conocido como acrílico y por último el poliviniltolueno. El material centellador se conforma con una concentración del orden de 1% en peso, aproximadamente 10 g/l del centellador primario y de 0.05% en peso del de un desplazador de onda. Posterior a su disolución en la base y posterior a la polimerización, ambas especies químicas quedan uniformemente distribuidas en la matriz polimérica.

Cuando una partícula ionizante atraviesa el centellador, el material primario emite en el UV, ese espectro tiene el camino libre para la luz en el plástico en unos pocos milímetros. El desplazador de onda absorbe los fotones UV y remite en una longitud de onda más larga. Según lo demande la aplicación, se puede agregar un segundo desplazador, para ajustar el espectro de la luz de centelleo con la respuesta espectral del foto detector [1, 3].

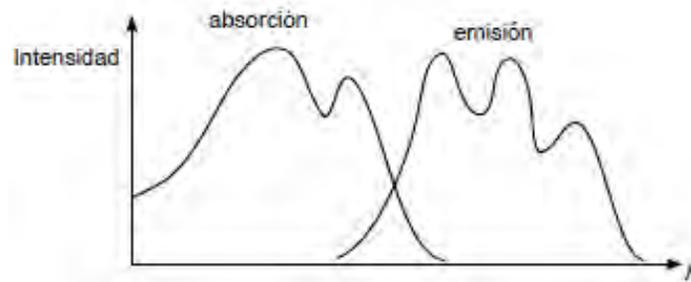


Figura 2.3. Espectro de absorción y emisión de un plástico centellador [1]

Los centelladores plásticos son fáciles de fabricar y se pueden mecanizar en la forma deseada. Actualmente se pueden conseguir en diversas geometrías, barras de diversas secciones, cilindros, prismas, laminas, a un costo relativamente bajo. Por su carácter de centellador orgánico, su tiempo de decaimiento es corto. Por esta razón, este tipo de detectores se lo utiliza para obtener información precisa de tiempos.

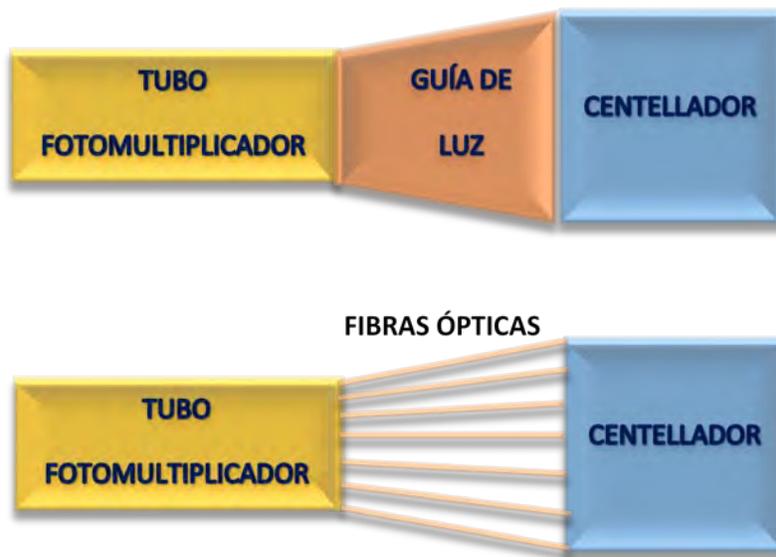


Figura 2.4. Montajes de plástico centellador y tubo fotomultiplicador [3]

Normalmente se utiliza el montaje mostrado en la figura 2.4, cuando se utiliza un centellador de gran área con un PMT, el acoplamiento se realiza mediante una guía de luz maciza o fibras ópticas.

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. 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. En el parte superior de la figura 2.4 una guía de luz de acrílico macizo dirige los fotones de centelleo hacia el fotomultiplicador. En el inferior de dicha ilustración, 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, conocido como teorema de Liouville, se puede mostrar que el flujo de fotones es incompresible. Es decir, 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.

#### 2.1.6. Centelladores inorgánicos

##### 2.1.6.1. Generalidades

Los centelladores inorgánicos son cristales crecidos en hornos de alta temperatura. Los más extensamente usados son haluros de metal alcalino, es decir, compuestos binarios de un metal del grupo 1 con un halógeno, como el yodo y flúor, usualmente con una pequeña cantidad de impurezas activadoras. El compuesto más utilizado es el  $NaI(Tl)$ , ioduro de sodio dopado con talio como activador, seguido por  $CsI(Tl)$ , ioduro de cesio, también dopado con talio como impureza activadora. Entre los cristales no alcalinos podemos mencionar a  $BGO$ ,  $Bi_4Ge_3O_{12}$  conocido como germanato de bismuto y  $BaF_2$ , fluoruro de bario.

En general, los centelladores inorgánicos poseen un tiempo de decaimiento del orden de los 300 ns, lo que significa que se encuentra entre 2 y 3 órdenes de magnitud por encima de los orgánicos. El centellador inorgánico más utilizado es el *Nal (Tl)*, yoduro de sodio dopado con talio. Para utilizar el cristal sin degradar sus propiedades, se le debe recubrir para evitar que el material absorba humedad del aire ambiente.

Una ventaja de este tipo de centellador es que entrega una mayor intensidad luminosa en la salida, lo que significa que entrega una mayor cantidad de fotones por unidad de energía absorbida, lo que representa que tiene una mejor resolución en energía de la partícula ionizante a medir. Por ello se utilizan para la detección y espectrometría de rayos gamma. Además de los cristales, algunos gases poseen la propiedad de centelleo, por ejemplo el nitrógeno y oxígeno que se encuentran en el aire atmosférico son responsables del brillo de color verdoso en las auroras polares, cuando partículas cargadas provenientes del Sol ingresan en la alta atmosfera. Sin embargo, la eficiencia como centelladores es baja [3].

#### 2.1.7. Comparación entre centelladores.

Las principales diferencias que se encuentran entre centelladores orgánicos e inorgánicos son su densidad, lógicamente su número atómico promedio, además del tiempo de respuesta y decaimiento. El costo, propiedades mecánicas y resistencia a la radiación son otros factores que determinan las aplicaciones de cada tipo de centellador. En la tabla de la tabla 2.1 están listadas propiedades de algunos centelladores relevantes.

Tabla 2.1. Propiedades de algunos cristales inorgánicos. Extraída y adaptada de *Radiation Detection and measurement*, Glenn Knoll, 4ta edición, págs. 230 y 238.

Centellador	tipo	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	fotones/MeV	$\tau$ decaimiento [ns]	$\lambda$ máx. [nm]
<b>Nal(Tl)</b>	inorgánico	3.67	38000	230	410
<b>Csl(Tl)</b>	inorgánico	4.51	65000	1300	560
<b>BGO</b>	inorgánico	7.13	8200	300	480
<b>NE104</b>	plástico	1.03	10000	1.8	406
<b>NE224</b>	líquido	0.88	12000	2.5	425
<b>NE102</b>	plástico	1.03	10000	1.8	423

Los orgánicos tienen una densidad del orden de 1 g/cm<sup>3</sup>; por otro lado los inorgánicos presentan densidades mayores, por ejemplo, para el *Nal (Tl)*, *Csl (Tl)* y *BGO*, de 3.67; 4.51 y 7.13 g/cm<sup>3</sup>; respectivamente.

Dado que los mecanismos de interacción de los fotones con la materia, dependen fuertemente de *Z* y de la cantidad de átomos por unidad de volumen que está relacionado con la densidad, los centelladores inorgánicos resultan adecuados para la detección y espectrometría de fotones. Los

centelladores plásticos pueden ser utilizados para este fin, pero la sensibilidad a los fotones será considerablemente menor.

En el caso de partículas cargadas, la emisividad de fotones por unidad de energía absorbida de inorgánicos y orgánicos es de la misma orden de magnitud. Los cristales mencionados, *NaI (TI)*, *CsI (TI)* y *BGO*, presentan 3.8; 6.5 y 0.8 x 10<sup>4</sup> fotones/MeV; respectivamente; comparado con 1x 10<sup>4</sup> fotones/MeV de los centelladores orgánicos. De aquí que, a la hora de escoger el centellador para esta aplicación, otros factores sean los preponderantes, en donde los orgánicos resultan frecuentemente escogidos.

Otra aplicación importante de los centelladores orgánicos, ricos en hidrogeno, es la detección de neutrones rápidos, con energía entre 1 keV y 10 MeV. Los neutrones incidentes hacen dispersión (scattering) elástica con los protones del material centellador, arrancándolos de la molécula constituyente con una cierta energía cinética. El frenado del protón transfiere energía al material centellador vecino dando lugar a luz de centelleo.

Los centelladores orgánicos presentan tiempos de respuesta y decaimiento ordenes de magnitud por debajo de los inorgánicos, aunque hay escasas excepciones. La rápida respuesta permite obtener información de tiempos, es decir, la diferencia temporal entre dos eventos con gran precisión, como por ejemplo el arribo sucesivo de dos partículas. El tiempo de decaimiento está relacionado con el tiempo muerto que existe cuando el detector y la electrónica no pueden discriminar el arribo de una nueva partícula, de esta forma limita la tasa de conteo máxima del sistema. Por ello los centelladores orgánicos son más adecuados cuando se desean obtener respuestas rápidas o altas tasas de conteo.

Respecto a las propiedades mecánicas, los plásticos resultan mucho más nobles para maquinarse que el cristal inorgánico; claro que los líquidos no toman parte de esta disputa. Los inorgánicos son frágiles y pesados, lo cual limita su mecanizado y manipulación. Además de que ciertos inorgánicos presentan higroscopicidad, como el *NaI (TI)*, lo cual obliga a mantenerlo cubierto para aislarlos de la humedad ambiente. Nada de eso ocurre con los plásticos: se los puede inyectar en moldes, extruir, laminar, tornear y cortar sin dificultades.

La radiación ionizante, fundamentalmente se tiene el concepto de que daña la materia. Por ejemplo en los cristales inorgánicos, induce dislocaciones y sitios intersticiales en la red, crea tensiones mecánicas y provoca migración de impurezas. Para los plásticos, degrada las cadenas poliméricas, destruyéndolas y creando entrecruzamiento y reticulados. Estos efectos traen como consecuencia la pérdida de transparencia de dichos materiales, lo que da como resultado un mal desempeño como detectores centelladores. Para ello se utilizan tratamientos térmicos que reviertan dichos problemas en los cristales inorgánicos: si se supera la temperatura de recristalización, los defectos de la red migran y la transparencia se restablece parcial o totalmente. Sin embargo para los plásticos, esta regeneración es limitada o nula.

Además para los orgánicos líquidos y plásticos, la radiación rompe enlaces químicos y destruye definitivamente las moléculas de centellador primario y desplazador de onda, lo que genera una

disminución de su emisividad. Para un centellador orgánico, una dosis alrededor de 1 kGy genera una pérdida de desempeño significativa. Por el contrario el rango de daño para los inorgánicos es más amplio, como por ejemplo el *Nal (Tl)*, que sufre daños a partir de dosis de 10 kGy [1, 2, 3, 4].

#### 2.1.8. Plástico centellador NE 102.

Este plástico será el utilizado como transductor, el cual es la primera opción a utilizar como detector de propósito general. Debido a que cuenta con excelentes propiedades como alta producción de luz (65% antraceno), buena transmisión de luz (aproximadamente 2.5 metros de longitud de atenuación técnica), tiempo de decaimiento rápido (aproximadamente 2.4 nanosegundos) [25]. El plástico emite con una longitud de onda máxima de 423 nm, y tiene una densidad de 1.03 g/cm<sup>3</sup>. La primer empresa en fabricarlo fue Nuclear Enterprise sin embargo Saint-Gobain lo fabrica con el nombre BC-400.

## 2.2. Fibra óptica

### 2.2.1. Introducción

Un sistema de comunicación transmite información de un lugar a otro, ya sea separado por unos pocos kilómetros o por distancias transoceánicas. La información se realiza a menudo por una onda portadora electromagnética cuya frecuencia puede variar de unos pocos megahercios a varios cientos de Tera hercios. Los sistemas de comunicación ópticos utilizan altas frecuencias de portadoras (~ 100 THz) en la región visible o cercano al infrarrojo del espectro electromagnético. A veces se llaman sistemas de ondas de luz para distinguirlos de los sistemas de microondas, cuya frecuencia portadora es típicamente más pequeña por cinco órdenes de magnitud (~1 GHz). Los sistemas de comunicación de fibra óptica son sistemas de ondas de luz que emplean a las fibras para la transmisión de información. Tales sistemas se han desplegado por todo el mundo desde 1980 y de hecho han revolucionado la tecnología detrás de las telecomunicaciones.

De hecho se cree, que la tecnología de ondas de luz junto con la microelectrónica, son un factor importante en el crecimiento de la "era de la información", [26].

La fase de investigación de los sistemas de comunicación con fibra óptica comenzó alrededor de 1975. El enorme progreso realizado durante el período de 25 años que se extiende desde 1975 hasta 2000 se puede agrupar en varias generaciones distintas. La figura 2.5 muestra el aumento en la relación de longitud contra capacidad de información en bits (*BL*), los datos para realizar esta grafica fueron recolectados por experimentos realizados en distintos laboratorios. La línea recta corresponde a una duplicación de la relación *BL* cada año. Cada nueva generación trae un cambio fundamental que ayuda a mejorar el rendimiento del sistema [27].

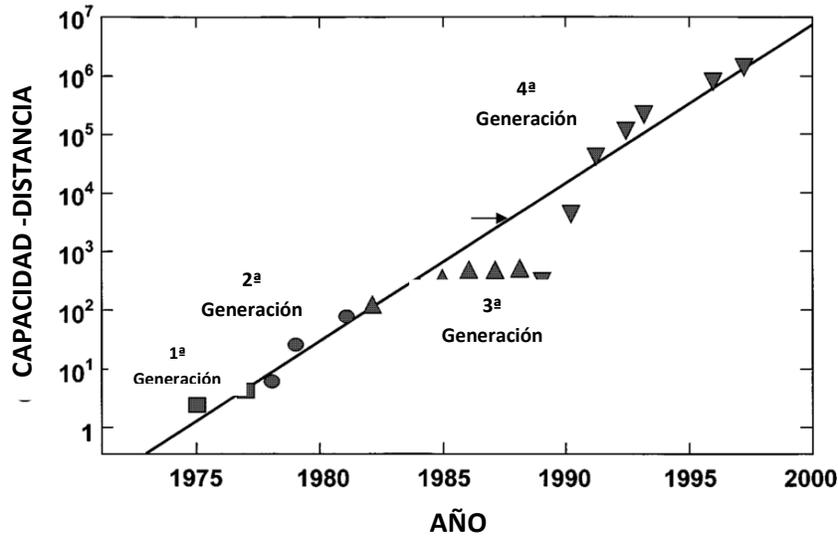


Figura 2.5. Grafica del progreso de la capacidad de transmisión de información por kilómetro en sistemas ópticos.

En su forma más simple una fibra óptica consiste en un núcleo cilíndrico de vidrio de sílice rodeado por un revestimiento cuyo índice de refracción es menor que la del núcleo.

Debido a un cambio de índice abrupto en la interface núcleo-revestimiento, tales fibras se denominan fibras de salto de índice. En otro tipo de fibra, con índice graduado, el índice de refracción disminuye gradualmente en el interior del núcleo.

Las fibras ópticas presentan ventajas con respecto a los conductores de materiales metálicos, entre las principales figuran:

1. Transmisión de luz, en consecuencia no se introduce interferencia.
2. Tiene gran capacidad de transmisión (180 a 200 comunicaciones telefónicas a la vez) con respecto a los conductores de cobre.
3. La transmisión no es interferida por campos eléctricos y magnéticos
4. La energía en la transmisión es muy baja
5. Gran ancho de banda
6. Diámetro reducido
7. Peso reducido
8. Material totalmente dieléctrico, por ende no existe posibilidad de tensiones inducidas que pueden producir chispas o cortocircuitos.

Para las transmisiones por fibra óptica se utilizan las longitudes de onda del infrarrojo, o sea 800 a 1600 nm, siendo los valores preferidos los de 850, 1300, 1550 nm que es donde están las de menores interferencias.

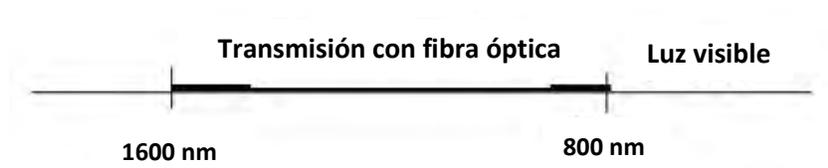


Figura 2.6. Ancho de banda para transmisión en una fibra óptica

### 2.2.2. Principio de Reflexión

Cuando un rayo luminoso incide sobre la superficie de separación de dos sustancias, una fracción del mismo se refleja [26].

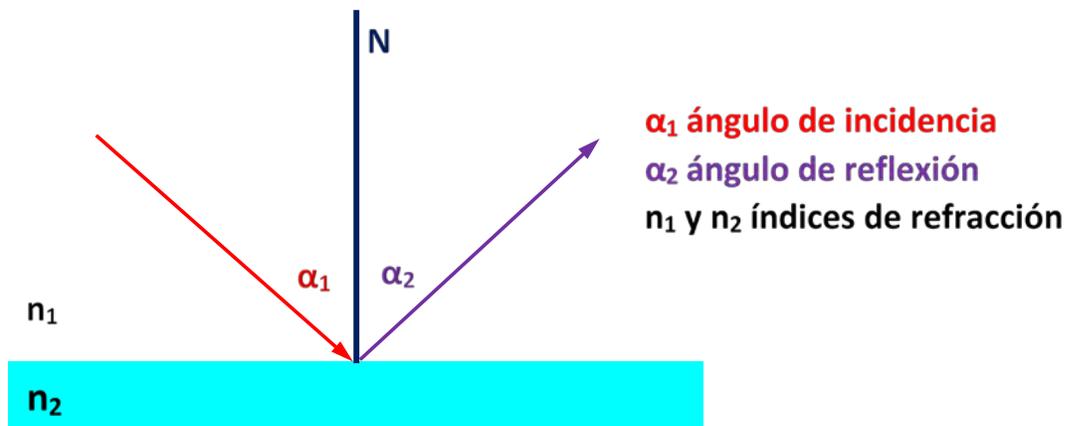


Figura 2.7. Principio de reflexión, ley de Snell

La proporción de la luz reflejada es función del ángulo  $\alpha$  que forma el rayo de luz incidente con la perpendicular a la superficie de separación de los medios. Por rayo de luz se entiende la trayectoria dentro de la cual se extiende la energía luminosa.

Si un rayo luminoso incide con un ángulo  $\alpha$  de modo oblicuo desde una sustancia ópticamente menos densa (aire) a otra más densa (vidrio), su dirección de propagación se quiebra y su trayectoria continúa en la segunda sustancia con un ángulo de refracción, diferente al de incidencia.

Para una sustancia isotópica, o sea un medio o material que presenta idénticas propiedades en todas sus direcciones, vale la ley de refracción de Snell.

El cociente entre el seno del ángulo de incidencia  $\alpha$  y el seno del ángulo de refracción  $\beta$  es constante e igual a la relación de las velocidades de la luz  $c_1$  y  $c_2$  en ambas sustancias.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} \quad \text{Ec. (2.1)}$$

De dos sustancias transparentes, se considera más densa a aquella que posee la menor velocidad de propagación de la luz.

Considerando la transición desde el vacío (aire) en el cual la velocidad de la luz  $c_0$  a una sustancia con velocidad de la luz  $c_1$  se obtiene:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_0}{c_2} \quad \text{Ec. (2.2)}$$

La relación entre la velocidad de la luz en el vacío  $c_0$  y la de luz en una sustancia ( $c$ ), se denomina índice de refracción "n" (o más exactamente índice de refracción entre dos fases) de esa sustancia, y es una constante del material. El índice de refracción del vacío (aire)  $n_0$  es igual a uno.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_0}{c_2} = n \quad \text{Ec. (2.3)}$$

### 2.2.3. Reflexión Total

Cuando el rayo luminoso incide con un ángulo  $\alpha$  cada vez mayor desde una sustancia ópticamente más densa con un índice de refracción  $n_1$  sobre la superficie de separación, con una sustancia ópticamente menos densa con índice de refracción  $n_2$ , el ángulo de refracción  $\beta$  comienza a aumentar, y llega a tomar el valor de  $90^\circ$  para un determinado ángulo de incidencia.

Para ese valor de ángulo de incidencia, el ángulo refractado ya no viaja por la segunda sustancia sino que lo hace paralelo a la superficie de separación de las dos sustancias. El ángulo de incidencia que hace que ocurra este fenómeno se denomina ángulo crítico de las dos sustancias, y todos aquellos rayos que incidan con un valor de ángulo  $\alpha$  superior al ángulo límite, se van a reflejar totalmente por la sustancia que venía viajando, a este fenómeno se lo conoce como reflexión total.

La reflexión total ocurre únicamente cuando un rayo luminoso incide desde una sustancia ópticamente más densa sobre otra ópticamente menos densa y nunca se da en el caso inverso.

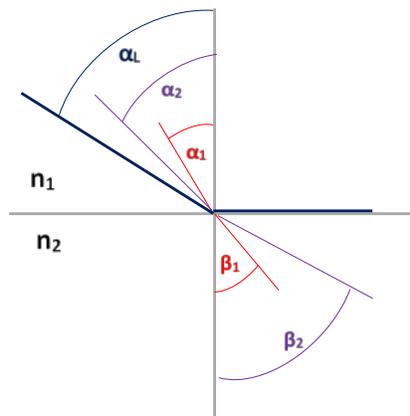


Figura 2.8. Representación del ángulo crítico para reflexión total

### 2.2.4. Apertura Numérica

Es un parámetro que da idea de la cantidad de luz que puede ser guiada por una fibra óptica. Por lo tanto cuanto mayor es la magnitud de la apertura numérica de una fibra, mayor es la cantidad de luz que puede guiar o lo que es lo mismo, más cantidad de luz es capaz de aceptar en su núcleo. La

ecuación para la apertura numérica ( $NA$ ) es la siguiente, representada por el esquema de la ilustración 2.9.

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad \text{Ec. (2.4)}$$

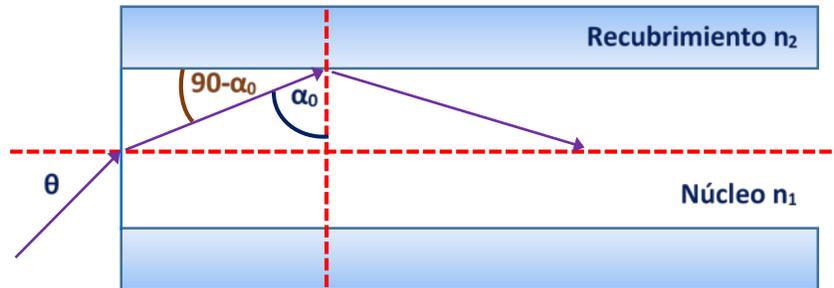


Figura 2.9. Apertura numérica en una guía de onda

#### 2.2.5. Propagación de la Luz en el conductor de Fibra Óptica

En general se denomina interferencia a la superposición de dos o más ondas y su combinación para formar una onda única. Una manifestación típica de la interferencia de dos ondas se obtiene solamente cuando ambas tienen la misma longitud de onda y existe una diferencia de fase constante entre ambas en el tiempo, este tipo de ondas se denomina ondas coherentes.

Si en determinado punto del espacio de ambas ondas presentan una diferencia de fase igual a un múltiplo entero de  $\lambda$  (longitud de onda), se produce una suma de sus amplitudes, en cambio si esta diferencia es igual a un múltiplo entero de  $2\lambda$  (media longitud de onda), una resta, y si ambas amplitudes son iguales, incluso una anulación local de la misma.

Las ondas luminosas permitidas susceptibles de propagarse en un conductor de fibra óptica se denominan modos. Estos modos se transmitirán de forma diferente según sea el perfil del conductor de fibra óptica.

##### 2.2.5.1. Perfiles de los conductores de FO

Si en un conductor de FO se considera el índice de refracción ( $n$ ) en función del radio ( $r$ ), se tiene el perfil del índice de refracción de este conductor. Con el mismo se describe la variación radial del índice de refracción de conductor de fibra óptica desde el eje del núcleo hacia la periferia de recubrimiento. La propagación de los modos en el conductor de F.O. depende de la forma de este perfil de índice de refracción.

##### 2.2.5.2. Perfil Escalonado

En un conductor de fibra óptica donde el índice de refracción  $n_1$  se mantiene constante en toda la sección del núcleo, se habla de un perfil escalonado, pues el índice se incrementa en forma de escalón a partir del valor que tiene en el recubrimiento hasta el que posee en el núcleo y que allí permanece constante. La fabricación de este conductor es sencilla.

Con el índice de refracción constante a lo largo del radio del núcleo, si en el extremo inicial del conductor, cada uno de estos modos es excitado con un ángulo de acoplamiento diferente estos se

propagan a lo largo del mismo con la misma velocidad y recorriendo diferentes trayectorias en forma zigzagueante, por lo cual llegan al otro extremo del conductor a diferentes momentos, un conductor de estas características se denomina multimodal. La relación entre los tiempos de recorridos máximo y mínimo es directamente proporcional a la relación entre los índices de refracción del recubrimiento y del núcleo.

Esta diferencia de tiempos produce una dispersión llamada dispersión modal, que es un efecto no deseado, ya que da lugar al ensanche del pulso luminoso de corta duración que atraviesa al conductor de fibra óptica, constituyendo una desventaja para las comunicaciones ópticas, ya que disminuye la velocidad de transmisión, o hace aumentar el ancho de banda ocupado.

Esta mezcla de modos se produce con mayor intensidad en las irregularidades del núcleo y en las curvaturas. Para disminuir los efectos no deseados en forma considerable se fabrican fibras ópticas donde el índice de refracción en el núcleo varía [27].

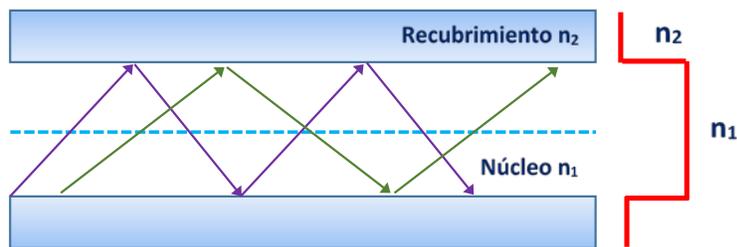


Figura 2.10. Perfil escalonado

### 2.2.5.3. Perfil Gradual

Cuando el índice de refracción del núcleo, varía en forma desde un valor máximo  $n_1$  en el eje del conductor y decae hasta otro valor  $n_2$  en el límite con el recubrimiento a este tipo de perfiles se los denomina perfiles graduales. Esta denominación se ha adoptado especialmente para el perfil parabólico.

Cuando el índice de refracción no es constante a lo largo del radio del núcleo, los rayos luminosos recorren el conductor de fibra óptica describiendo trayectorias onduladas o helicoidales; contrariamente al conductor de perfil escalonado, en cuyo caso los rayos se propagan en forma zigzagueante.

Como consecuencia de la variación continua del índice de refracción  $n_1$  en el núcleo, los rayos luminosos también se refractan continuamente variando su dirección de propagación al recorrer estas trayectorias helicoidales. Si bien los rayos que oscilan en torno del eje deben recorrer aún un camino más largo que el que se propaga en forma rectilínea a lo largo de este eje, pueden desarrollar una mayor velocidad, proporcional al menor índice de refracción que tiene el material en los puntos más alejados del eje, y así se compensa en el tiempo la mayor extensión del recorrido.

Como resultado de esta compensación se logra disminuir la mezcla de modos, por lo tanto la diferencia de tiempos de recorrido [27].

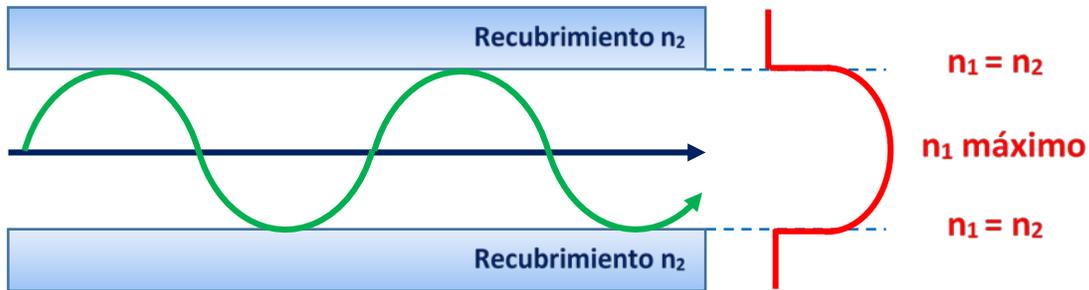


Figura 2.11. Perfil gradual

#### 2.2.5.4. Perfil escalonado monomodo

Se puede eliminar la dispersión modal, haciendo que por el conductor de fibra óptica se propague único modo, el modo fundamental, un conductor de fibra óptica de estas características se denomina monomodo, para reducir el número de modos, se debe reducir el diámetro del núcleo, a la apertura numérica o aumentar la longitud de onda.

De la apertura numérica depende esencialmente cuanta luz se puede acoplar al núcleo de conductor, por lo cual debería ser lo más elevado posible. La reducción del radio del núcleo es posible en forma limitada, en razón de tornarse cada vez más dificultoso el manipuleo y las técnicas requeridas para el conexionado.

Por otra parte, se torna más dificultosa la fabricación de emisores y receptores para frecuencias más elevadas y en consecuencia su valor no se puede incrementar a discreción.



Figura 2.12. Perfil escalonado monomodo

### 2.3. Fotomultiplicadores

Un fotomultiplicador convierte la luz en una señal eléctrica y, a continuación amplifica la señal a un nivel útil de la emisión de electrones secundarios. La figura 2.13 muestra elementos esenciales [28]:

1. Un fotocátodo que convierte la luz en flujo de electrones;
2. Un sistema de entrada de electrones-óptico que enfoca y acelera el flujo de electrones;
3. Un multiplicador de electrones que consiste en una serie de electrodos de emisión secundaria (dinodos).
4. Un ánodo que recoge el flujo de electrones desde el multiplicador y suministra la salida señal.

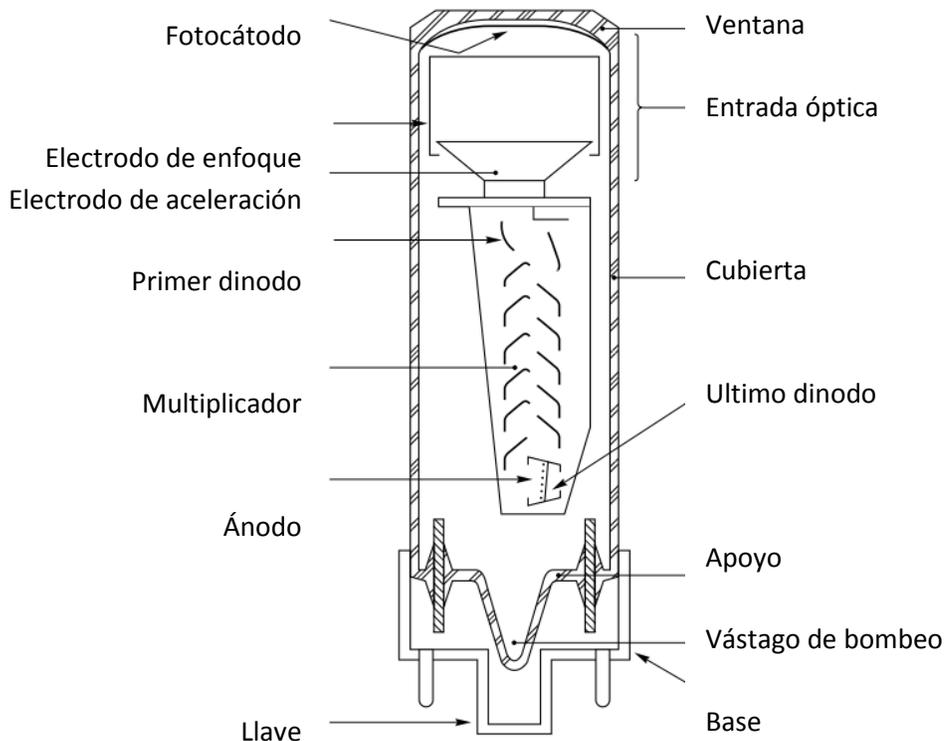


Figura 2.13. Elementos de un tubo fotomultiplicador [3]

### 2.3.1. Fotocátodo

Los cátodos utilizados normalmente en fotomultiplicadores están hechos de un semiconductor que sea fotosensible. Existen principalmente dos tipos:

- Cátodos semitransparentes, los más ampliamente utilizados, se depositan en el interior de la ventana de entrada; se emiten electrones desde el lado opuesto a la luz incidente. El cátodo puede ser grande (de diez a unos pocos cientos de milímetros de diámetro) y la ventana en la que se deposita puede ser plana o curvada.
- Cátodos opacos se depositan sobre un electrodo de metal en el interior del tubo. Los electrones son emitidos desde el lado iluminado. La zona está normalmente limitada a unos pocos centímetros cuadrados, debido al tamaño de los electrodos de enfoque.

La función del fotocátodo es liberar la mayor cantidad de electrones como sea posible, dada una cantidad de fotones incidentes. Cuando un fotón incide el, transfiere su energía a un electrón del material, alrededor de 3 eV para un centellador con emisión en la región azul/violeta. A temperatura ambiente, la energía media de los electrones es 0.025 eV, con lo cual, el electrón perderá energía por colisiones en su trayecto hacia la superficie del material. Si al llegar allí, aún tiene suficiente energía como para superar la barrera energética de la interfaz del material con el vacío, el electrón podrá escapar de dicho material. Esta barrera es frecuentemente llamada función trabajo, que para los metales supera los 4 eV, y de 1.5 eV para semiconductores dopados. Así, puede verse que tan solo una porción de los electrones liberados por los fotones incidentes serán capaces de escapar del fotocátodo [3, 29].

En la figura 2.14 se pueden observar la gráfica de la eficiencia cuántica de materiales utilizados en el fotocátodo contra la longitud de onda, los picos de eficiencia cerca de la longitud de onda de 400 nm los hace muy adecuados para trabajar con centelladores [3].

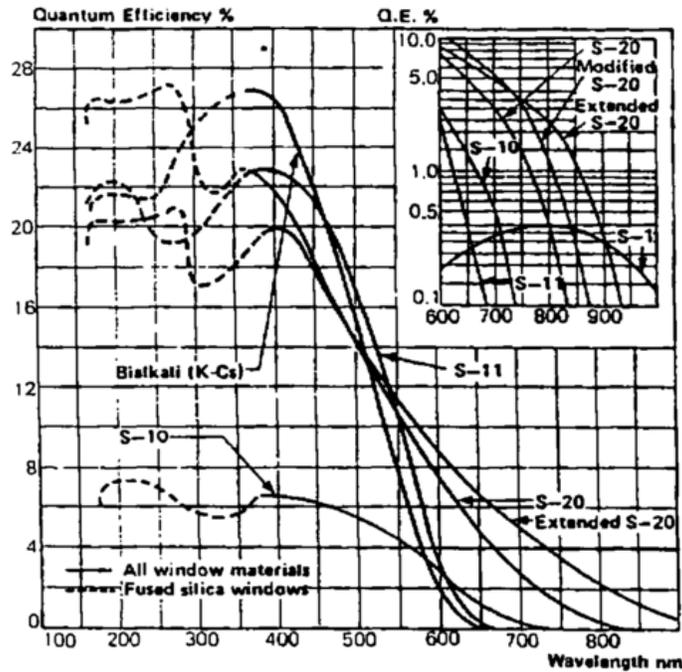


Figura 2.14. Eficiencia cuántica de materiales utilizados en el fotocátodo

### 2.3.2. Ventana de entrada

El material de la ventana de entrada limita la sensibilidad espectral a cierta longitud de onda. En la figura 2.15 y la Tabla 2.2 dan las características de algunos de los vidrios utilizados [29].

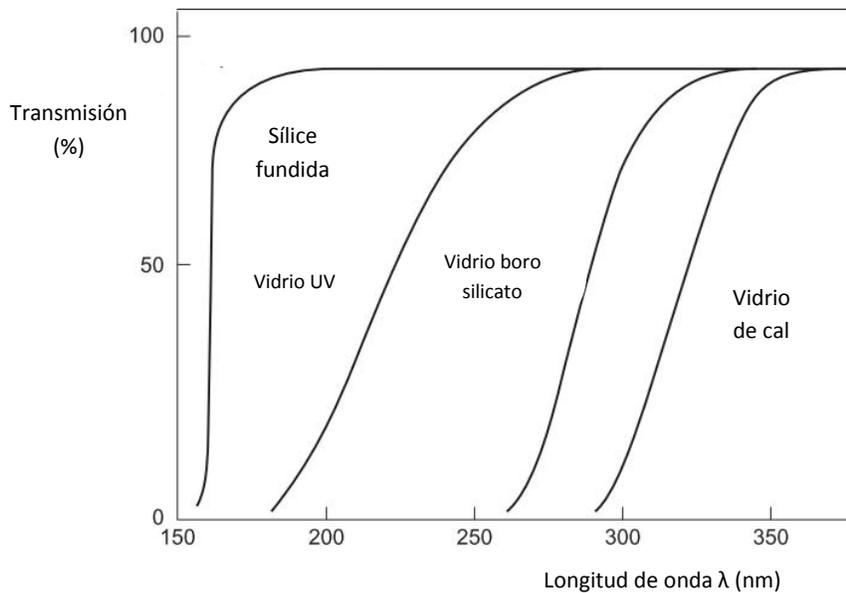


Figura 2.15. Características de vidrios utilizados en fotomultiplicadores

Tabla 2.2. Tabla de características de los tipos de ventanas de fotomultiplicadores

TIPO DE VENTANA (MATERIAL)	LONGITUD DE ONDA PARA CORTE (DECRESE AL 10%) (nm)	INDICE DE REFRACCION $n$ a $\lambda=400$ nm
Vidrio de cal	300	1.54
Boro silicato	270	1.50
Vidrio UV	190	1.49
Sílice fundida	160	1.47
Zafiro ( $Al_2O_3$ )	145	1.80
$MgF_2$	115	1.40

### 2.3.3. Dinodo

Cuando un fotón incide sobre un dinodo con la energía cinética suficiente, puede arrancar electrones secundarios del material. De los electrones excitados por el electrón incidente, tan solo una pequeña fracción logrará escapar del dinodo para aportar a la multiplicación. El factor de multiplicación de un dinodo  $\delta$ , definido como la cantidad de electrones secundarios emitidos por electrón incidente. Los materiales frecuentemente utilizados en los dinodos tienen un  $\delta=5$ , de modo que para obtener ganancias de  $10^6$ , típica de un PMT comercial, es necesario un arreglo del orden de 10 dinodos. Existen ciertas configuraciones de dinodos descritas a continuación [29].

1. Dinodos de persiana veneciana. Son tiras paralelas inclinadas respecto al eje del tubo y apiladas paralelamente al fotocátodo. La gran superficie del primer dinodo hace posible la gran entrada de electrones. Tiene una buena eficiencia de recolección y estabilidad de ganancia pero la respuesta es lenta debido a que el campo eléctrico es bajo en la superficie de los dinodos.
2. Caja de dinodos. También conocida como caja y la rejilla dinodos; con una gran área de recolección en el primer dinodo, tiene una buena eficiencia de colección, con un campo eléctrico bajo en la superficie interna de las cajas, no contribuye a las características de tiempo.
3. Dinodos de enfoque lineal. Los dinodos están diseñados para asegurar un enfoque progresivo de las trayectorias de los electrones a través del multiplicador. Esto reduce la variación de los tiempos entre etapas y logra tener una respuesta muy rápida. Debido a la necesidad de lograr el mejor acoplamiento entre la entrada óptica y el multiplicador, los primeros dinodos están conformados y colocados de manera diferente del resto.
4. Dinodos en jaulas circulares. En contraste a los dinodos de enfoque lineal, esta disposición conduce a multiplicadores altamente compactos.
5. Malla de dinodos. Estos consisten en planos paralelos de malla de alambre fino. Su eficiencia de recolección de dinodo a dinodo es baja, pero la malla de dinodos bien diseñados puede funcionar en campos magnéticos de alrededor de un tesla
6. Dinodos perforados. Estos consisten en láminas metálicas perforadas con aberturas bien definidas. Su área de recolección es alta y su eficiencia entre es aproximadamente la misma que las persianas venecianas.

La figura 2.16 muestra las configuraciones de dinodos.

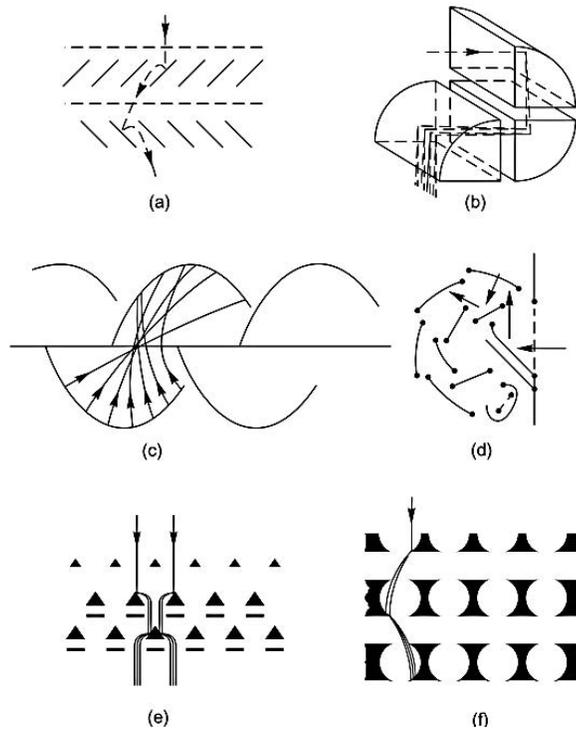


Figura 2.16. Configuración de dinodos, caso 1 (a), caso 2 (b), caso 3 (c), caso 4 (d), caso 5 (e) y caso 6 (f)

#### 2.3.4. Ánodo

El ánodo es aquel electrodo con potencial positivo, el cual atrae electrostáticamente a las cargas negativas.

La forma y la disposición del ánodo a la salida del multiplicador difieren de los utilizados en la parte de los dinodos. La geometría debe ser adecuada para:

- La recopilación de todos los electrones secundarios emitidos por el último dinodo
- Se minimizan los efectos de carga de espacio para asegurar una respuesta lineal en funcionamiento en modo de pulso
- Adaptar la impedancia del ánodo a la impedancia característica de la conexión de salida.

#### 2.3.5. Polarización

Para que el electrón liberado en el fotocátodo sea atraído por el primer dinodo, este último debe tener mayor potencial que el fotocátodo. Del mismo modo, el segundo dinodo debe estar a mayor potencial que el primero, y así, sucesivamente, en donde el ánodo debe poseer el mayor potencial de todos los electrodos. Las formas de lograr esto están representadas en la figura 2.17. En el circuito (a), el fotocátodo está conectado a tierra, mientras que el ánodo, a alta tensión positiva. En el (b), el fotocátodo está conectado a alta tensión negativa, y el ánodo, a tierra.

En principio, ambas congelaciones resultan equivalentes; sin embargo, la opción (a) es la más extendida. En general, es preferible colocar el blindaje eléctrico del sistema centellador-PMT a tierra, por razones de seguridad eléctrica. En la configuración (a), el blindaje, el fotocátodo y la tierra

del detector, es decir, el retorno de la salida del PMT, están todos cortocircuitados. En la opción (b), se debe tener especial cuidado de que no hayan perdidas de corriente entre el blindaje y el fotocátodo, lo que requiere un montaje adecuado. Sin embargo, hay dos aplicaciones en la cual la opción (b) es preferida [1].

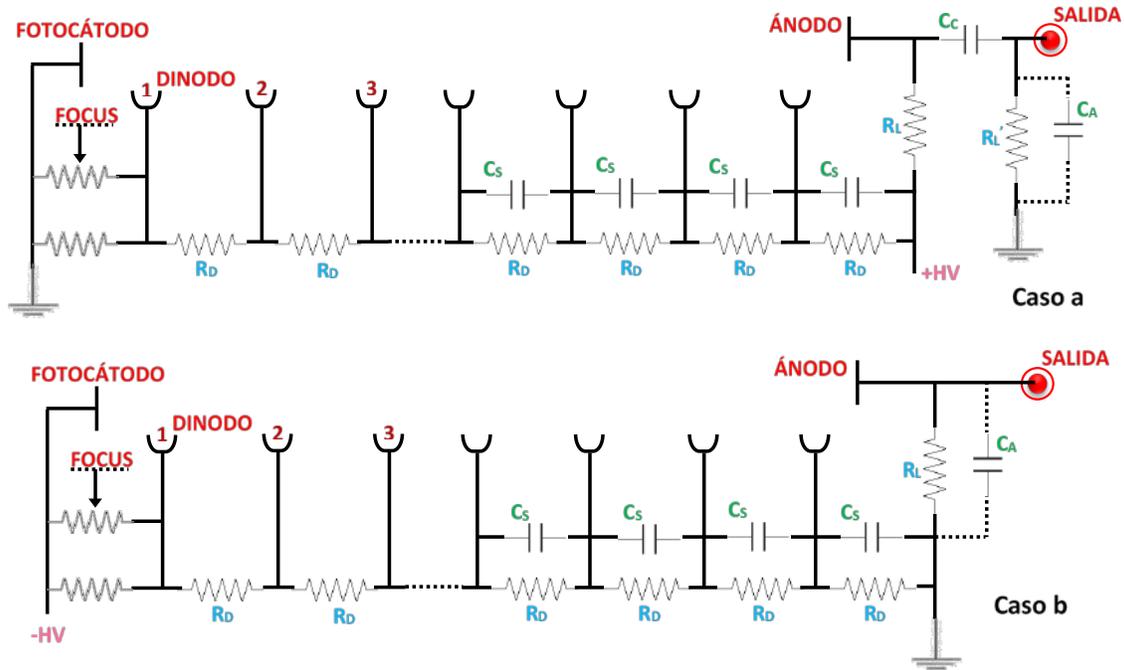


Figura 2.17. Circuitos de polarización del fotomultiplicador; a) con voltaje positivo y b) con voltaje negativo [1]

## 2.4. Electrónica (preamplificador, amplificador y analizador multicanal).

### 2.4.1. Preamplificador

La función principal de un preamplificador es extraer la señal del detector sin degradar significativamente la señal intrínseca a ruido. Por lo tanto, el preamplificador se encuentra lo más cerca posible al detector, y los circuitos de entrada están diseñados para adaptarse a las características del detector. Diferentes técnicas de procesamiento de impulsos se emplean típicamente, dependiendo de si la hora de llegada o la amplitud (energía) del evento detectado deben medirse. Conformación de impulsos para aplicación se lleva a cabo normalmente en un módulo posterior. Este módulo puede estar situado a cierta distancia del preamplificador, a condición de que la fidelidad de la señal no se degrada debido a la longitud del cable coaxial de interconexión [30].

Existen tres tipos básicos de preamplificadores, descritos a continuación.

El preamplificador sensible a la corriente. Varios detectores generan una señal de salida moderadamente grande y en rápido ascenso a través de una alta impedancia de salida. El procesamiento del pulso en la medición del tiempo o conteo puede ser bastante simple. Utilizando correctamente el cable coaxial de 50  $\Omega$  que está unido a la salida del detector, de modo que el

impulso de corriente genera el voltaje deseado a través de la carga de  $50 \Omega$  del cable. Para tubos fotomultiplicadores de 14 etapas no requiere amplificación. El esquema del preamplificador sensible a la corriente es el siguiente [30].

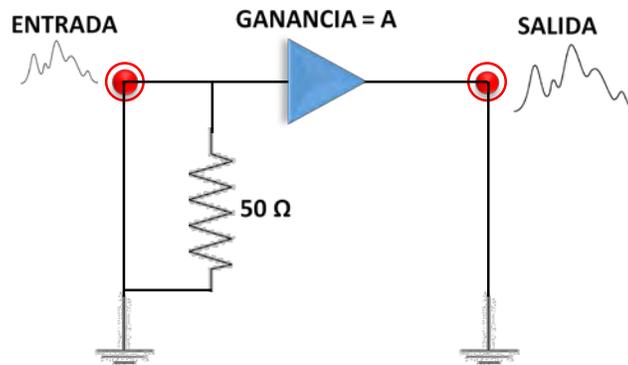


Figura 2.18. Esquema simplificado del preamplificador sensible a la corriente [30]

Por lo tanto la conversión a voltaje del pulso de corriente queda dado por la ecuación 2.5.

$$V_{out} = 50I_{in} \text{ (volts)} \quad (2.5)$$

El preamplificador de capacitancia parasita. Debido a las señales de salida moderadamente grandes con tiempos de subida muy rápidos, el preamplificador más rentable para mediciones de pulso de amplitud o la espectrometría de energía con estos detectores, es el preamplificador de capacitancia parasita que se muestra en la ilustración [30].

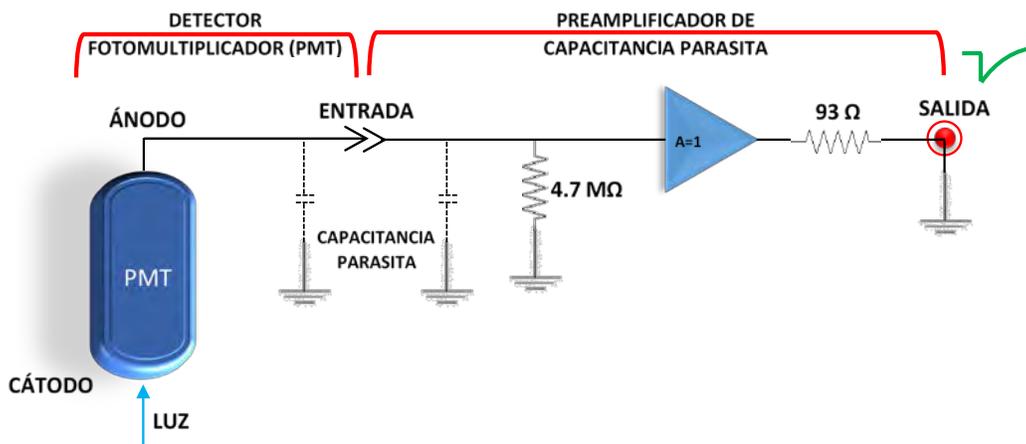


Figura 2.19. Esquema del preamplificador de capacitancia parasita [30]

Los preamplificadores de capacitancia parasita tienen una alta impedancia de entrada aproximadamente de  $5 \text{ M}\Omega$ , debido a la capacitancia a la entrada del preamplificador que es típica de  $10 \text{ a } 50 \text{ pF}$ . Una resistencia conectada en paralelo con la capacitancia de entrada provoca un decaimiento exponencial del pulso con una constante de tiempo de alrededor de  $50 \mu\text{s}$ . La resistencia de  $93 \Omega$  a la salida absorbe los impulsos reflejados por la impedancia del cable coaxial.

El preamplificador sensible a carga. Son los preferidos para las aplicaciones de espectrometría de energía. La señal procedente del detector semiconductor o de iones suministrada como un impulso de corriente con duración  $10^{-9}$  a  $10^{-5}$  s.

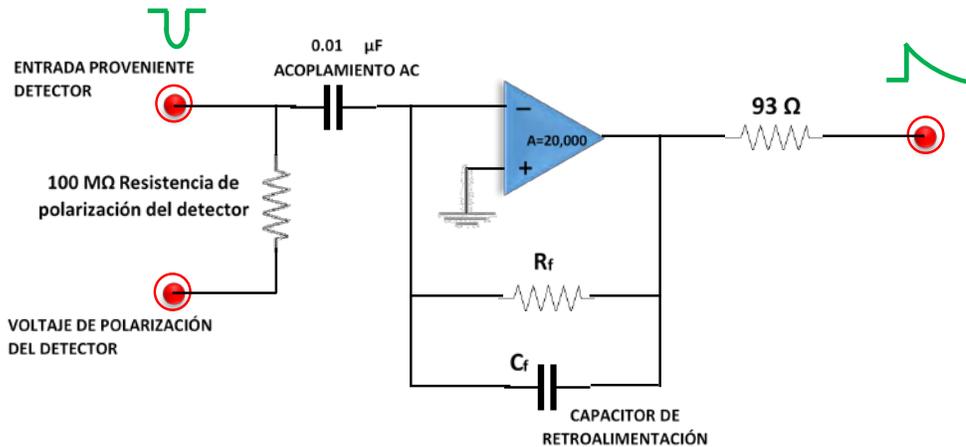


Figura 2.20. Esquema simplificado del preamplificador sensible a carga [30]

Normalmente en las aplicaciones se interpreta la cantidad de carga o el tiempo de un evento. Un preamplificador sensible de carga puede proporcionar cualquiera o ambos; debido a que integra la carga en el condensador de realimentación, además su ganancia no es sensible al cambio en la capacitancia del detector; para el caso ideal, el tiempo de subida del impulso de salida es igual a la anchura del pulso de corriente del detector.

La tensión de salida del preamplificador tiene una amplitud  $V_O$ , y una constante de tiempo de decaimiento  $\tau_f$ , que están dadas por las siguientes ecuaciones 2.6 y 2.7.

$$V_O = \frac{Q_D}{C_f}, \quad (2.6)$$

$$\tau_f = R_f C_f, \quad (2.7)$$

donde  $Q_D$  es la carga liberada por el detector,  $C_f$  es el capacitor de retroalimentación y por último  $R_f$  es la resistencia de retroalimentación [30].

#### 2.4.2. Amplificador

Las funciones principales de un amplificador lineal, son la de amplificar los pulsos que vienen del preamplificador, además de conformar el pulso para las necesidades de instrumentación que se tengan; para los dos casos, el amplificador debe resguardar la información.

Si se requiere los datos del tiempo, deberá ser lo necesariamente rápido. Si lo que se desea son los datos de las energías, deberá existir una proporcionalidad entre la entrada y la salida, por ello recibe el nombre de amplificador lineal. La relación de amplificación es variable según la aplicación, aunque normalmente es de 10 a 500; esta ganancia es ajustable con la combinación de ajustes gruesos y finos. Sin embargo se satura el amplificador si el producto de la amplitud de entrada y la relación

de amplificación supera la máxima amplitud de salida del amplificador; lo que llevaría a tener un pulso de salida distorsionado, donde la cresta de la señal estará plana a la amplitud de saturación.

Claramente se podría evitar bajando la ganancia; sin embargo es recomendable evitar amplificar aquellos pulsos cercanos a la amplitud de saturación. El amplificador lineal tiene dos tipos de salida, la bipolar y la unipolar mostradas en la gráfica de la figura 2.21. La unipolar se encuentra retrasada unos 100 ms con respecto a la bipolar; también tiene un ajuste del tiempo de formación del pulso que permite variar el ancho del pulso.

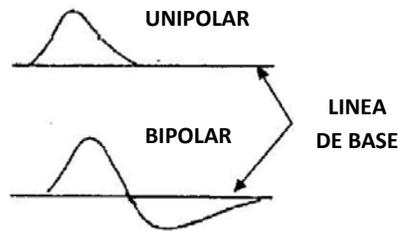


Figura 2.21. Señal unipolar y bipolar

La forma más sencilla de formar el pulso es con la combinación de un filtro de pasa altas y uno pasa bajas; el primero mejora la razón señal a ruido eliminando las frecuencias más bajas, que llevan mucho ruido y poca información, además corta el decaimiento del pulso; por otro lado el pasa bajas mejora la señal eliminando las altas frecuencias que contienen un ruido excesivo, también alarga la subida del pulso.

Existe un amplificador con una función distinta, el llamado amplificador polarizado (biasado); su propósito es amplificar una porción de una señal lineal. Es preponderante cuando se requiere expandir una región del espectro para un análisis más detallado; para lograrlo posee un nivel de corte variable. En la gráfica de la figura 2.22 se ve el funcionamiento de este tipo de dispositivo.

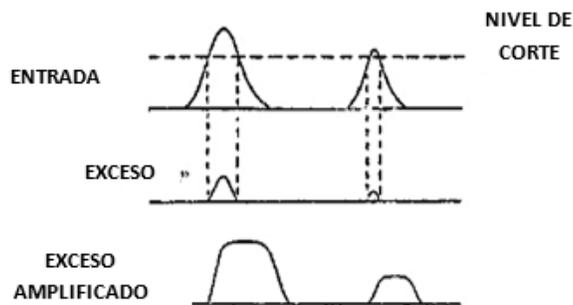


Figura 2.22 Señal de corte al utilizar un amplificador polarizado

### 2.4.3. Analizador multicanal

El analizador multicanal (MCA) es un instrumento electrónico de laboratorio que mide la distribución de los pulsos. Normalmente se utilizan dos modos diferentes, el analizador de altura de pulso (PHA) y multicanal escalador (MCS). Para el PHA, los pulsos de entrada se clasifican en canales en función de su amplitud, mientras que para el MCS se clasifican de acuerdo al momento en que llegan. El MCA tiene una presentación visual de las distribuciones resultantes y por lo general puede dar salida a los datos a una impresora o un ordenador para su posterior análisis [31]. Los MCA antiguos utilizan un control basado en electrónica analógica, mientras que los más modernos son controlados por un microprocesador y tienen capacidades de operación aritmética. El esquema general del analizador multicanal es el siguiente.

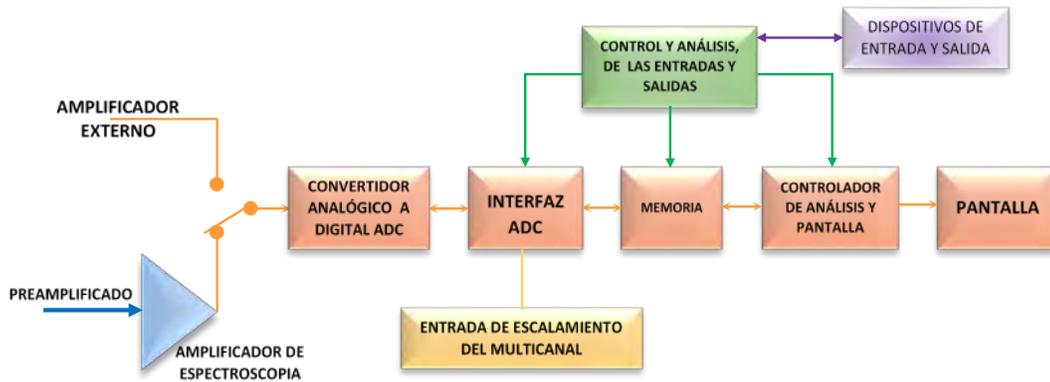


Figura 2.23. Diagrama a bloques del analizador multicanal

Cuando un detector, ofrece una respuesta que representa la energía de los rayos gamma, se produce un impulso de carga eléctrica por cada fotón de rayos gamma que es detectado. El preamplificador recoge esa carga, además de que agrega el menor ruido posible, posterior a esto se convierte la carga a un impulso de tensión, para que sea transmitido al amplificador. En el amplificador se aplican filtros pasa bajas y pasa altas a la señal para que se mejore la relación señal a ruido, además de aumentar la amplitud del pulso. A la salida del amplificador, se obtiene el pulso con duración del orden de  $\mu\text{s}$ , y amplitud de pulso proporcional a la energía del fotón detectado. Es donde el analizador multicanal hace su tarea realizando un seguimiento de los pulsos con su altura durante un período de tiempo, posterior a esto muestra el espectro de energía de los rayos gamma detectados.

## 2.5. Análisis de eficiencia del plástico centellador.

En el esquema de la figura 2.24, se describe el sistema de detección que se ocupa en la investigación.

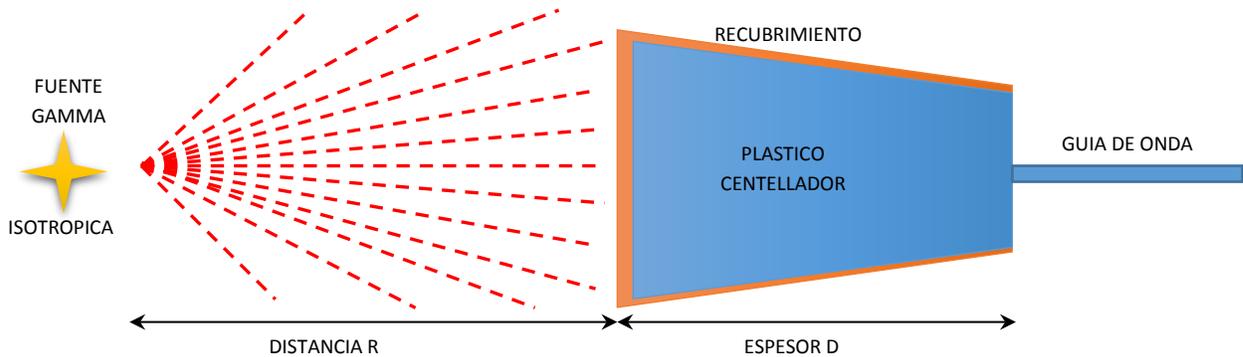


Figura 2.24. Esquema del detector centellador con la fuente de radiación gamma

En el sistema la fuente gamma genera fotones isotrópicos con cierta energía, por medio del plástico centellador los fotones son convertidos a pulsos de luz, posteriormente los fotones son propagados a través de una guía de onda hasta que se transmitan a un fotomultiplicador donde serán convertidos en pulsos eléctricos.

Una parte importante de la investigación es realizar el análisis de eficiencia del detector, para lo cual se identifica qué configuración de acoplamiento es la más eficaz.

- A. Un plástico centellador con función de transductor en forma de cilindro acoplado a un taper de plástico que propague la luz a una guía de onda para su posterior propagación al fotomultiplicador representada en la figura 2.25.

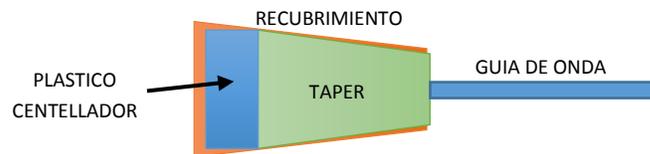


Figura 2.25. Plástico centellador cilíndrico acoplado a un taper y guía de onda

- B. Un plástico centellador que además de ser transductor funciona también como taper en la forma de cono truncado y acoplado a la guía de onda para la propagación de la luz, mostrada en la figura 2.26.

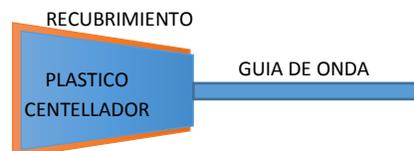


Figura 2.26. Plástico centellador utilizado como guía de onda en forma de cono truncado acoplado a la guía de onda

- C. Un plástico centellador que además de ser transductor funciona también como taper utilizado como guía de onda en forma de cilindro y acoplado a la guía de onda para realizar la propagación de la luz, mostrado en la figura 2.27.

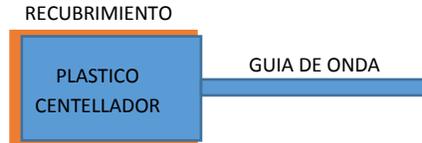


Figura 2.27. Plástico centellador utilizado como guía de onda en forma de cilindro acoplado a la guía de onda

Para obtener la eficiencia del detector de centelleo **DE** se utiliza la ecuación 2.8. [32]

$$DE = GIM, \quad (2.8)$$

donde,  $G$  es el índice geométrico,  $I$  representa la eficiencia de acoplamiento y  $M$  la transmisión.

El índice geométrico  $G$  se obtiene por la ecuación 2.9 que ocupa el ángulo sólido en estereorradianes del área de impacto del plástico centellador.

$$G = \frac{A}{4\pi R^2} = \frac{\pi r^2}{4\pi R^2}, \quad (2.9)$$

donde,  $r$  es el radio de la circunferencia de impacto del plástico centellador con un área en forma de circunferencia y  $R$  es la distancia entre la fuente y el plástico centellador mostrado en la figura 2.24. Se contrasta que el área es directamente proporcional al coeficiente  $G$ , por el contrario la distancia es inversamente cuadrática.

Por otra parte la eficiencia  $I$  se obtiene por las pérdidas de propagación con la ecuación 2.10.

$$I = e^{-\mu_1 d_1} * \dots * e^{-\mu_n d_n}, \quad (2.10)$$

donde,  $\mu_1 \dots \mu_n$  son los coeficientes de atenuación de los distintos materiales por donde pasaron los fotones de energía Gamma; por otro lado  $d_1 \dots d_n$  son las distancias que recorren los fotones en cada material. Lo que indica que para distancias muy pequeñas el índice tiene a ser igual a uno; por el contrario si los fotones recorren distancias muy grandes el índice tiende a ser cero.

Por último en la ecuación 2.11 tenemos el índice  $M$  que se genera en el plástico centellador y que utiliza la siguiente expresión.

$$M = 1 - e^{-\mu d}, \quad (2.11)$$

donde, de igual manera  $\mu$  y  $d$  representan el coeficiente de atenuación y la distancias recorrida por los fotones gamma en el plástico centellador. La transmisión al ser inversa a la atenuación se tiene que mayor tamaño  $d$  del plástico el índice  $I$  tiene a ser uno; por lo contrario si el espesor es muy pequeño el índice tiende a ser cero.

Por ende al sustituir la ecuación 2.9, 2.10 y 2.11 en la ecuación 2.8, la eficiencia del detector es igual la ecuación 2.12.

$$DE = GIM = \frac{\pi r^2}{4\pi R^2} (e^{-\mu_1 d_1} * \dots * e^{-\mu_n d_n}) (1 - e^{-\mu d}). \quad (2.12)$$

Al utilizar un sistema con un cilindro de radio  $r$  y espesor  $d$ , además con un solo recubrimiento y a una distancia  $R$  de la fuente, nos queda la siguiente ecuación.

$$DE = GIM = \frac{\pi r^2}{4\pi R^2} (e^{-\mu_1 d_1} e^{-\mu_2 d_2}) (1 - e^{-\mu d}). \quad (2.13)$$

Debido a que solo se analizará la forma geométrica y dimensiones del detector la ecuación queda de la siguiente manera:

$$DE = GIM = \alpha r^2 (1 - e^{-\mu d}), \quad (2.14)$$

donde  $\alpha = \frac{e^{-\mu_1 d_1} e^{-\mu_2 d_2}}{4R^2}$  es constante

Ya que las distintas configuraciones mostradas en la figura 2.25 y 2.26 utilizan un cono truncado o un cilindro, el cual puede ser representado por la integral del diferencial  $dx$ , siendo el diferencial un cilindro que conformará al cono truncado, como se muestra en la figura 2.28.

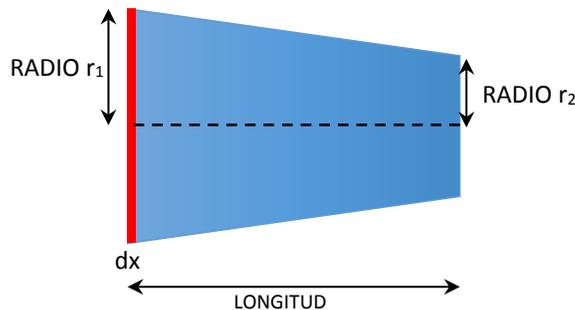


Figura 2.28. Plástico centellador en forma de cono truncado con el diferencial de un tamaño  $dx$

Debido a que el área de cada disco de diferencial  $dx$  cambiará según la posición del cono, se realiza un cambio de variable, con el propósito de obtener el área en términos del radio de entrada  $r_1$ , radio de salida  $r_2$ , la longitud  $D$  del plástico centellador y del diferencial  $dx$ , para ello se usan las ilustraciones 2.29 y 2.30; además de las ecuaciones 2.15 y 2.16.

$$\tan\beta = \frac{r_1 - r_2}{D} \quad (2.15)$$

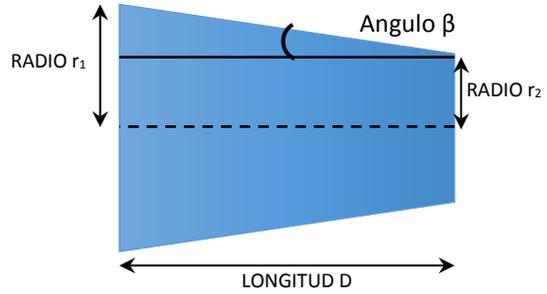


Figura 2.29. Plástico centellador en forma de cono truncado

$$\tan\beta = \frac{r'_1 - r_2}{D-x} \quad (2.16)$$

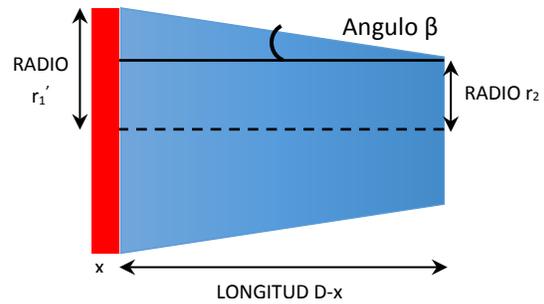


Figura 2.30. Cono truncado cambio de variable

Por lo tanto igualamos las ecuaciones 2.15 y 2.16, con ello se obtiene la ecuación 2.17.

$$\tan\beta = \frac{r_1 - r_2}{D} = \frac{r'_1 - r_2}{D-x} \quad (2.17)$$

Despejando a  $r'_1$ , se logra el cambio de variable

$$r'_1 = \frac{(D-x)(r_1 - r_2)}{D} + r_2 \quad (2.18)$$

Se desarrolla la ecuación 2.18 para obtener el cambio de variable mostrado en la ecuación 2.19.

$$r'_1 = r_1 - \frac{(r_1 - r_2)x}{D} = r_1 + \frac{(r_2 - r_1)x}{D} = r_1 + z x, \quad (2.19)$$

donde  $z = \frac{(r_2 - r_1)}{D}$  es constante.

El  $r'_1$  lo sustituimos en la ecuación 2.14 para obtener la eficiencia del detector en términos de  $x$ ; con ello sólo tendremos que realizar una integral de 0 a  $D$  para obtener la eficiencia de un cono truncado, mostrado en la ecuación 2.20.

$$DE_{cono} = GIM = \alpha \int_0^D (r_1 + zx)^2 (1 - e^{-\mu x}) dx \quad (2.20)$$

Por lo tanto se desarrolla la integral de la ecuación 2.20, y se sustituye  $z$  y  $\alpha$ .

$$\alpha=1 \text{ y } z = \frac{(r_2-r_1)}{D}$$

Por lo tanto se obtiene la ecuación 2.21.

$$DE_{cono} = \frac{1}{3}D(r_1^2 + r_1r_2 + r_2^2) + \frac{1}{\mu}r_2^2e^{-\mu D} + \frac{2}{\mu^3D^2}e^{-\mu D}(r_2 - r_1)^2 + \frac{2r_2}{\mu^2D}e^{-\mu D}(r_2 - r_1) - \frac{1}{\mu}r_1^2 - \frac{2}{\mu^3D^2}(r_2 - r_1)^2 - \frac{2r_1}{\mu^2D}e^{-\mu D}(r_2 - r_1) \quad (2.21)$$

En el capítulo 3 se presenta la simulación de la ecuación 2.21 que representa la eficiencia de detección de un plástico centellador cuando se tiene como variable el radio de salida de la forma geométrica del plástico, además de que se realizaran algunas experimentaciones para demostrar los resultados.

## 2.6. Análisis de propagación del campo electromagnético

Utilizando el software libre Optifdtd designer [33] se dibujaron las configuraciones de acoplamiento utilizando los plásticos centelladores con forma de cono truncado y cilindro, acoplado a la fibra óptica. En las ilustraciones 2.31 y 2.32 se muestran las configuraciones en tres dimensiones.

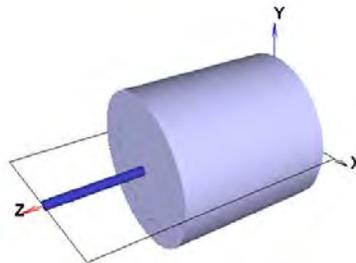


Figura 2.31. Ensamble de la guía de onda y un acoplador o taper en forma de cilindro

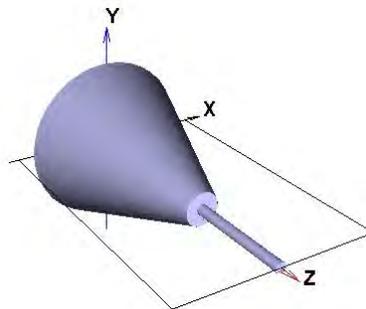


Figura 2.32. Ensamble de la guía de onda y un acoplador o taper en forma de cono truncado

Posteriormente al programa se le introducen valores de los índices de refracción para cada una de las secciones obteniendo las figuras 2.33 y 2.34, en las cuales se aprecia en forma tridimensional el

perfil de índice de refracción a lo largo del eje de propagación, las figuras están en forma isométrica para visualizar de mejor manera los valores del índice de refracción.

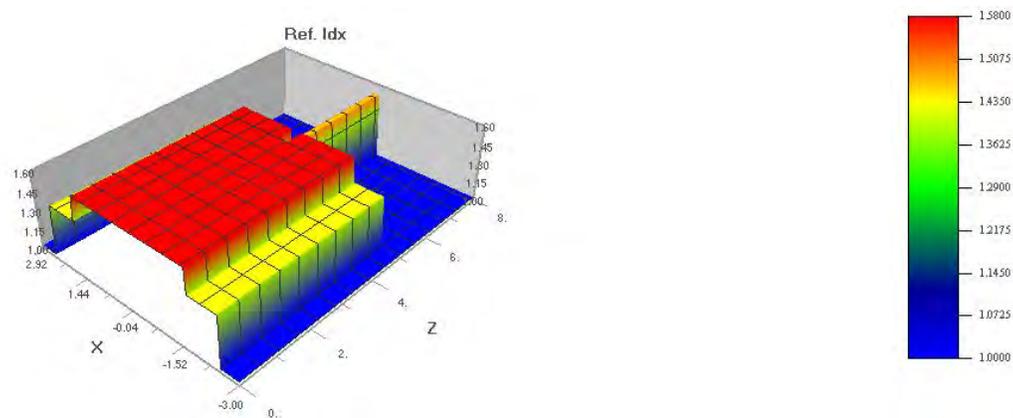


Figura 2.33. Perfil de Índices de refracción del ensamble de la fibra y un cilindro como detector

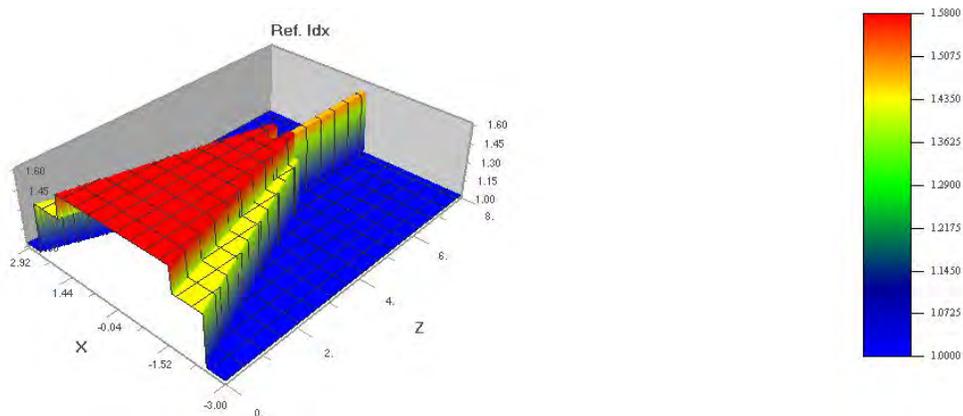
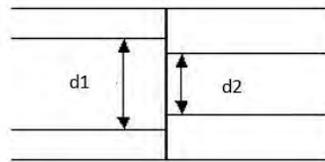


Figura 2.34. Perfil de Índices de refracción del ensamble de la fibra y un cono truncado como detector

## 2.7. Pérdidas por diferencias de diámetros en el acoplamiento.

En la figura 2.35 se muestra un acoplamiento con diferentes diámetros en el núcleo, con ello se tienen pérdidas por el acoplamiento.



Desajuste del diámetro del núcleo

$$Pérdidas = \begin{cases} -20 \log_{10} \frac{d_2}{d_1} & d_2 < d_1 \\ 0 & d_2 \geq d_1 \end{cases}$$

Figura 2.35. Pérdidas por acoplamiento de diferentes diámetros

En los acoplamientos que se analizan cuentan con diferencia entre sus diámetros por ello se simula con  $d_2$  constante y un valor de 10 mm, por otro lado  $d_1$  lo se cambiará desde 10 mm hasta 50 mm; la gráfica de la simulación se muestra en la figura 2.36.



Figura 2.36. Pérdidas por acoplamiento entre el detector y la fibra

Se observa que entre mayor sea la diferencias entre los diámetros existirá mayor pérdidas por ello la importancia de que los diámetros sean muy cercanos para que exista la menor cantidad de pérdidas.

### 3. SIMULACIÓN Y EXPERIMENTACIÓN

#### 3.1. GENERALIDADES

Para realizar las simulaciones se utilizó el software OptiFDTD en su versión libre, este software contiene dos sistemas una para realizar el diseño y el otro para realizar la simulación de la propagación de los campos en su forma TE y TM.

Se decidió utilizar un analizador multicanal para generar los espectros Compton de dos fuentes radiactivas utilizadas en la investigación, el  $^{137}\text{Cs}$  y  $^{60}\text{Co}$  las cuales tienen las características de la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Características de las fuentes radiactiva utilizadas.

NUCLEÍDO	TIPO DE RADIACION	CODIGO DE COLOR	NO. DE FUENTE	ACTIVIDAD ( $\mu\text{Ci}$ )	EXACTITUD %	$T_{1/2}$ (Años)	FECHA DE ACTIVIDAD
$^{137}\text{Cs}$	Gamma	AMARILLO	2S274	10.90	3.7	30.08	1 ABRIL 1986
$^{60}\text{Co}$	Gamma	VERDE CLARO	2U259	11.50	1.9	10.467	1 ABRIL 1986

Al utilizar el analizador multicanal no solo se obtiene el número de pulsos obtenidos por el sistema, si no el espectro característico de cada fuente y con ello se validará que el sistema es capaz de distinguir el tipo de fuente utilizada.

Para realizar las diversas mediciones espectrométricas se utilizó un esquema eléctrico general, el cual consiste en un fotomultiplicador acoplado ópticamente a las diversas configuraciones y por otro lado conectado eléctricamente a un preamplificador ORTEC 113 [34] que proporciona una señal al amplificador ORTEC 572 [35] quien envía la información a un ADC de la marca Canberra que está conectado a un analizador multicanal Canberra 88 para realizar las diversa espectroscópicas.

El esquema eléctrico general para la experimentación fue el siguiente.



Figura 3.1. Diagrama a bloques del equipo electrónico para la experimentación

### 3.2. Caracterización del plástico centellador

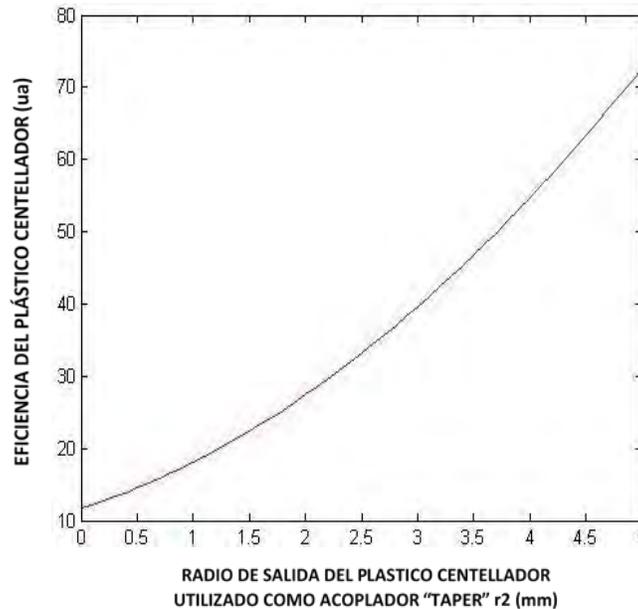
#### 3.2.1. Eficiencia del detector

Para obtener la eficiencia del plástico se utilizó la ecuación 2.21, donde se realiza una simulación de la forma cónica del plástico; iniciando con un radio de salida  $r_2=0$ , que constituye un cono muy cerrado mostrado en la figura 3.2 inciso a); hasta llegar a un radio de salida similar al de entrada  $r_2=r_1$  que construye un cilindro mostrado en la figura 3.2 inciso b)



Figura 3.2. Cono con radio de salida a)  $r_2=0$  y b)  $r_2=r_1$

Los resultados de la simulación se presentan en la figura 3.3; esta grafica se realizó utilizando la ecuación 2.21 y teniendo como variable al radio de salida  $r_2$ .



$$DE_{cono} = \frac{1}{3}D(r_1^2 + r_1r_2 + r_2^2) + \frac{1}{\mu}r_2^2e^{-\mu D} + \frac{2}{\mu^3D^2}e^{-\mu D}(r_2 - r_1)^2 + \frac{2r_2}{\mu^2D}e^{-\mu D}(r_2 - r_1) - \frac{1}{\mu}r_1^2 - \frac{2}{\mu^3D^2}(r_2 - r_1)^2 - \frac{2r_1}{\mu^2D}e^{-\mu D}(r_2 - r_1)$$

Figura 3.3. Simulación de la ecuación de la eficiencia del plástico centellador

Para corroborar la simulación se realizó la experimentación utilizando dos formas de plástico centellador acopladas directamente al fotomultiplicador, los plásticos están fabricados con material NE-102, cuyas características se presentan en el punto 2.1.8, además los plásticos se pulieron ópticamente como se muestra en la figura 3.4; ambas formas tienen la misma cantidad de material.

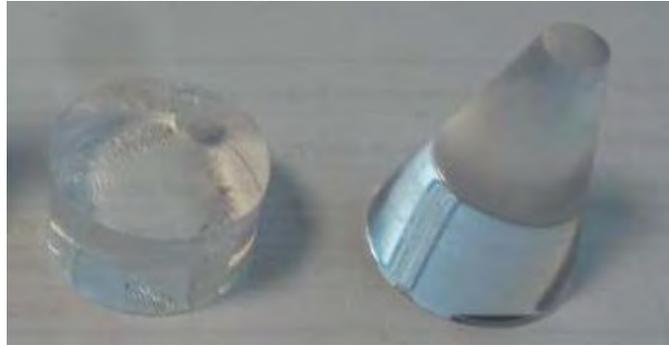
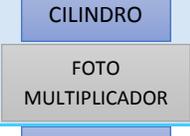
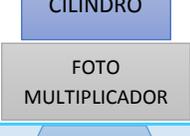


Figura 3.4. Plásticos centelladores utilizados para realizar la experimentación.

Durante la experimentación se utilizaron las fuentes radiactivas  $^{137}\text{Cs}$  y  $^{60}\text{Co}$ , además se ocuparon diferentes configuraciones con los plásticos centelladores utilizados, las configuraciones son descritas en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Ensayos de experimentación de plásticos centelladores

ENSAYO	CONFIGURACION	TIEMPO DE CONTEO	ALIMENTACION FOTOMULTIPLICADOR	FUENTE RADIOACTIVA	NOMBRE GRAFICA
1		500 SEGUNDOS	1100 VOLTS	$^{137}\text{Cs}$	CON-CS
2		500 SEGUNDOS	1100 VOLTS	$^{60}\text{Co}$	CON-CO
3		500 SEGUNDOS	1100 VOLTS	$^{137}\text{Cs}$	CIL-CS
4		500 SEGUNDOS	1100 VOLTS	$^{60}\text{Co}$	CIL-CO
5		500 SEGUNDOS	1100 VOLTS	$^{137}\text{Cs}$	CON-CIL-CS
6		500 SEGUNDOS	1100 VOLTS	$^{60}\text{Co}$	CON-CIL-CO

Cada experimento generó en el analizador multicanal un espectro de acuerdo a la configuración utilizada, en la figura 3.5 se muestran los espectros al utilizar el  $^{137}\text{Cs}$ . En las tres configuraciones se observan espectros parecidos con la forma característica del pico Compton del Cesio; aunque el pico de energía no se encuentra en el mismo punto, tienen un valor cercano a los 150 bits en el eje de energía obtenido del analizador multicanal, con ello se comprueba que la forma del plástico influye en la caracterización del sistema, también, al tener una mayor cantidad de material el espectro aumenta en número de cuentas; por otro lado, es importante mencionar que teniendo el mismo volumen el cilindro y el cono, el primero tuvo un mayor número de cuentas, esto se atribuye a la forma geométrica de los plásticos.

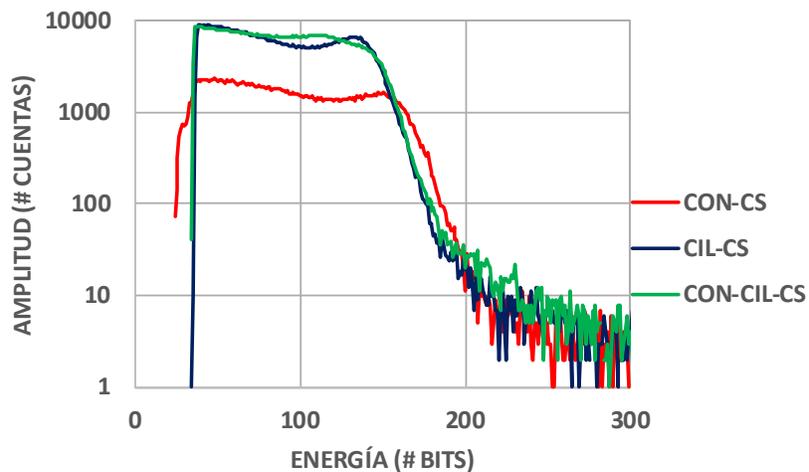


Figura 3.5. Espectros de los ensayos 1,3 y 5 descritos en la tabla 3.2 para la fuente de  $^{137}\text{Cs}$

También se muestran los espectros generados con la fuente de  $^{60}\text{Co}$ , la figura 3.6 muestra un comportamiento ídem en la forma de los espectros al utilizar el Cesio, sin embargo se puede visualizar que hizo falta estadística debido a que el espectro no se percibe totalmente definido.

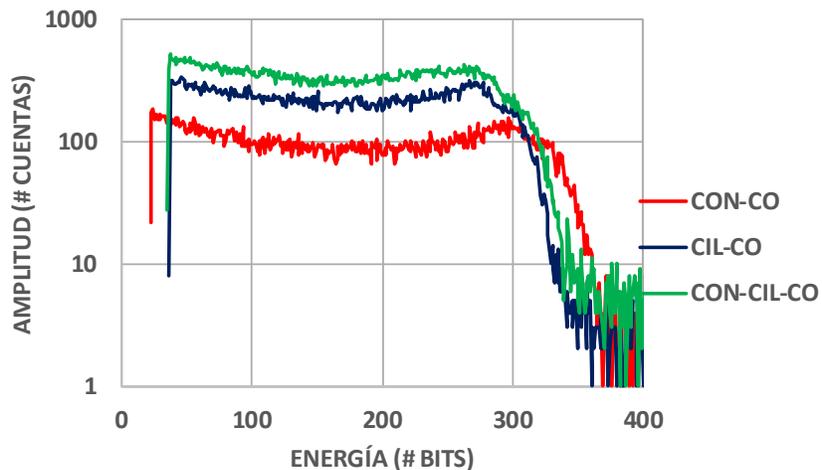
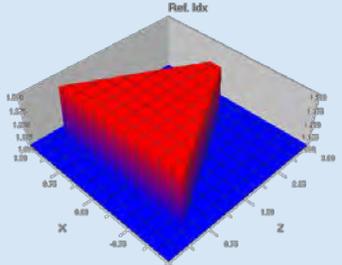
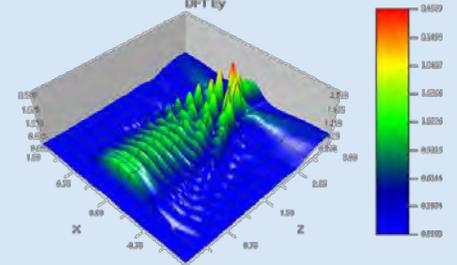
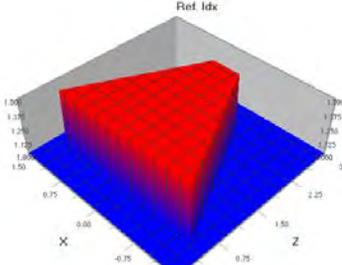
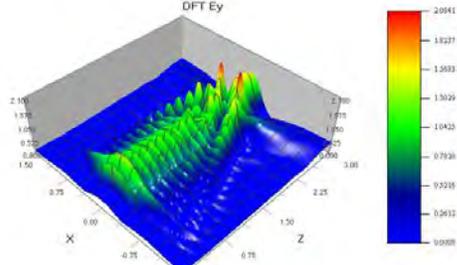
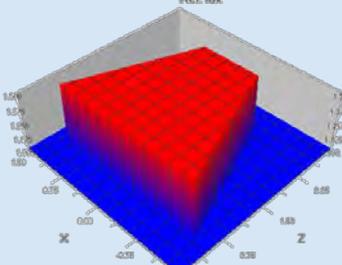
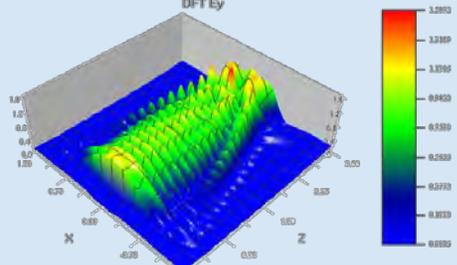
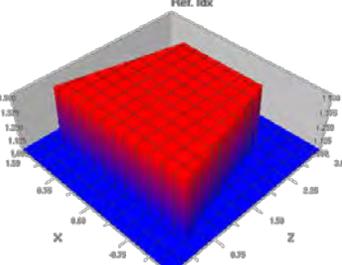
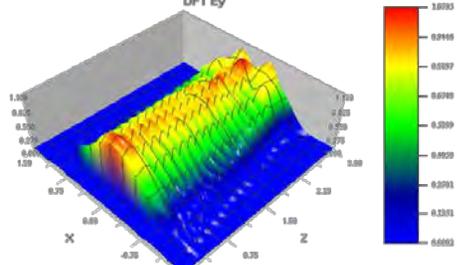


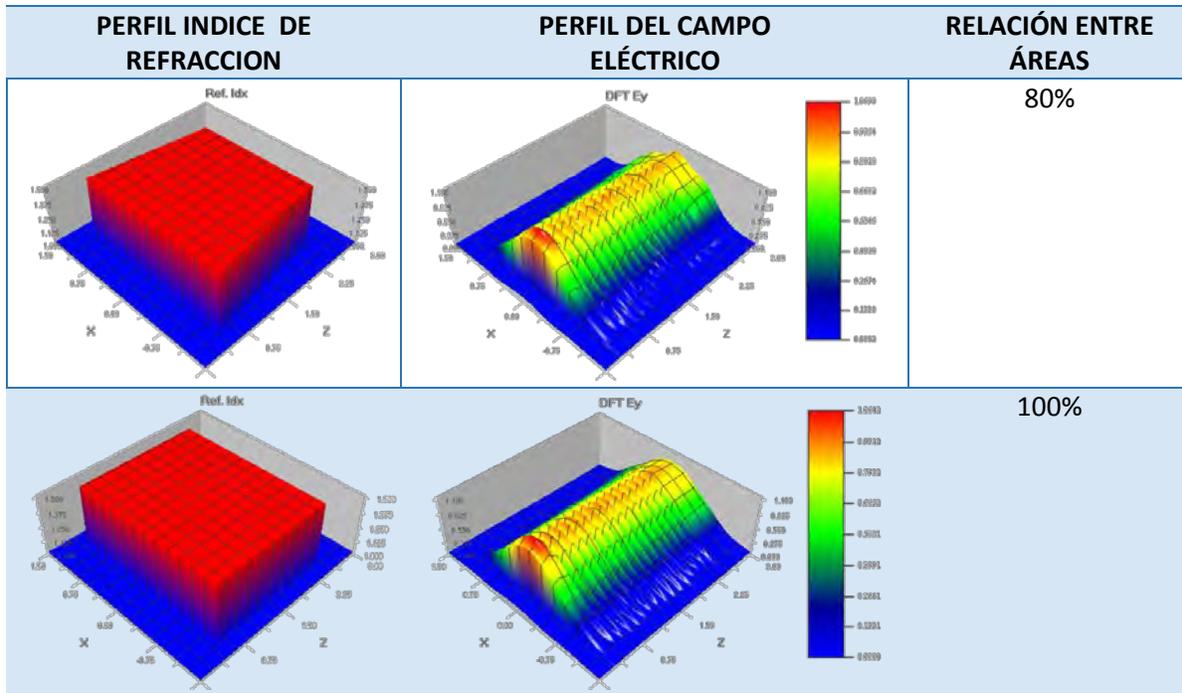
Figura 3.6. Espectros de los ensayos 2, 4 y 6 descritos en la tabla 3.2 para la fuente de  $^{60}\text{Co}$

### 3.2.2. Variación de área de salida del plástico centellador

Para el análisis del área de salida del taper, se simularon conos con un índice de refracción de 1.5 y longitud de onda de 423 nm, todos tienen la misma longitud a lo largo del eje de propagación; la variable es el área de salida respecto al área de entrada. En la tabla 3.3 se puede evaluar el perfil de índice de refracción y el campo eléctrico generado en las simulaciones con diferentes relaciones de áreas.

Tabla 3.3. Tabla de simulaciones realizadas con diferentes áreas de salidas

PERFIL INDICE DE REFRACCION	PERFIL DEL CAMPO ELÉCTRICO	RELACION ENTRE ÁREAS
		10%
		20%
		40%
		60%



Se observa que los espectros del campo eléctrico tuvieron menos pérdidas conforme aumentaba el área de salida en el taper o acoplador; para comparar los espectros en las distintas simulaciones, el software permite presentar el perfil del índice de refracción y los campos eléctricos en diferente posiciones del taper sobre el eje de propagación; en las gráficas de las figuras 3.7, 3.8 y 3.9 se muestran los espectros de la amplitud del campo eléctrico a la entrada, mitad y salida de cada acoplador simulado.

Para la entrada el espectro es ídem en todos los casos debido a que no existe ninguna confinación o cambio geométrico.

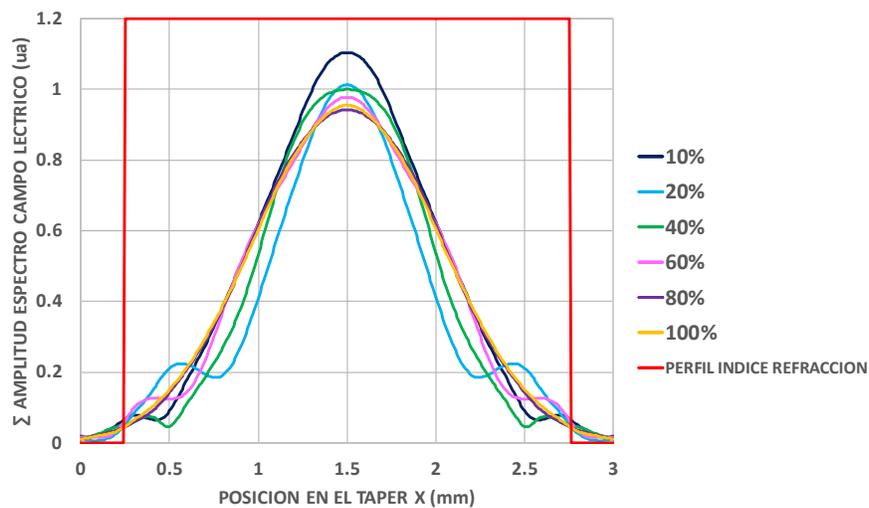


Figura 3.7. Espectro amplitud del campo eléctrico de la simulación a la entrada del taper

Caso parecido a la entrada se obtuvo a la mitad del taper sin embargo se comienza a ver un mayor campo evanescente en las orillas de los perfiles de cada uno de los casos.

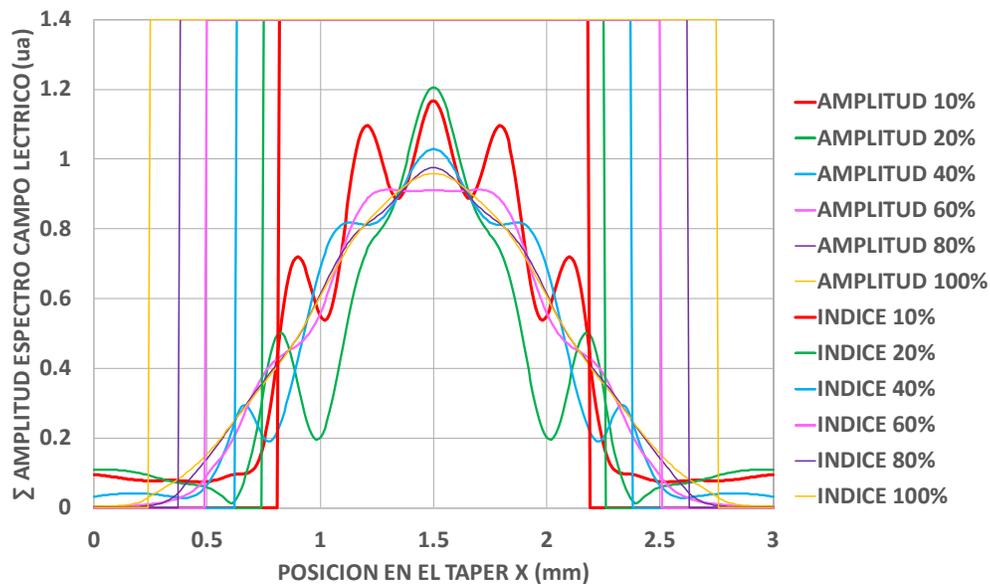


Figura 3.8. Espectro amplitud del campo eléctrico de la simulación a la mitad del taper

En la salida del taper se observa la confinación del campo a la mitad del taper (1.5 mm), además de que los campos comienzan a tener una mayor evanescencia a los extremos de sus perfiles.

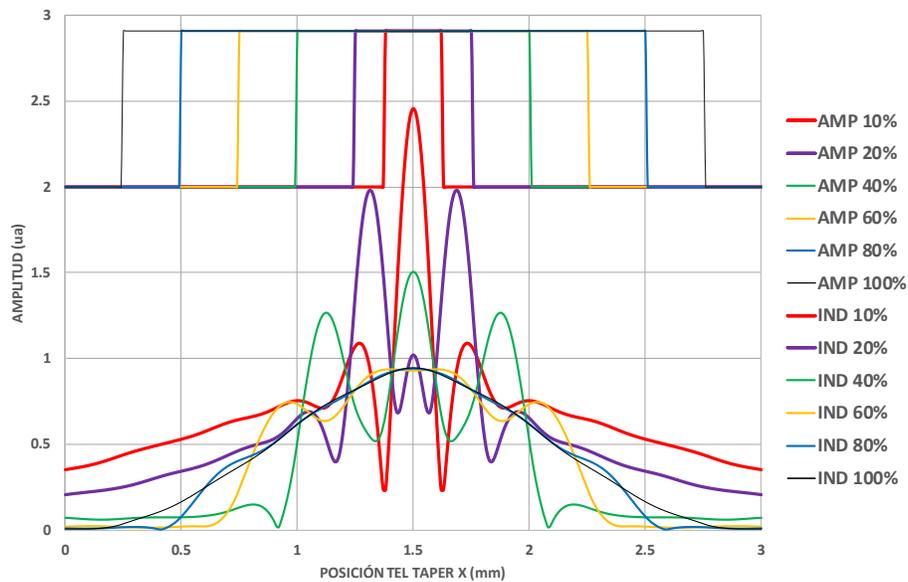


Figura 3.9. Espectro amplitud del campo eléctrico de la simulación a la salida del taper

Por último se comparan los perfiles simulados con mayor diferencia a la salida del taper, los espectros de la relación del 10% y 100% del área de salida respecto a la de entrada (cono y cilindro respectivamente) se muestran en la figura 3.10, donde se observa que el espectro del cono tiene un pico de amplitud mayor que el cilindro esto significa, que la propagación de la onda se va confinando

hasta obtener el espectro resultante; sin embargo en la sección 4.1.2 se muestran las integrales de los espectros, donde la integral del acoplamiento con el 100% (cilindro) tiene una mayor amplitud que el acoplamiento con el 10% (cono).

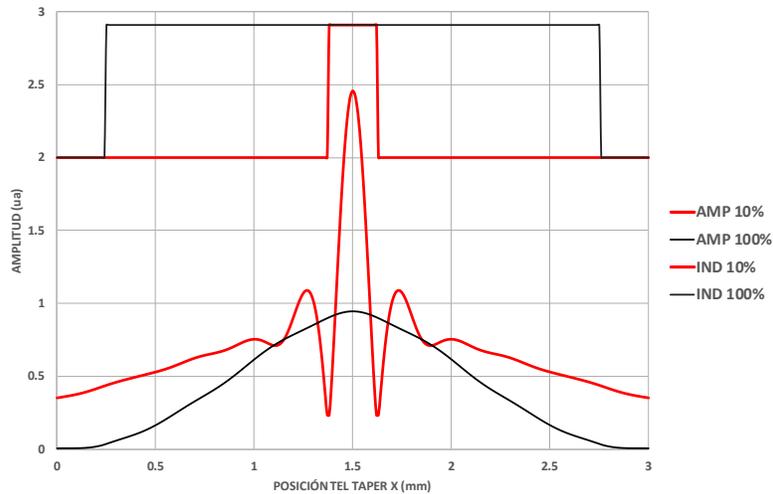


Figura 3.10. Comparación a la salida del taper con las relaciones de área del 10% y 100%.

Para la validación de las simulaciones, se realizó la experimentación utilizando un cilindro de plástico centellador NE-102 mostrado en la figura 3.3; además fueron utilizados tres conos de acrílico con un diámetro de entrada de 25 mm, su longitud es de 45 mm y diferentes diámetros en la salida, los tapers son mostrados en la figura 3.11.



Figura 3.11. Tapers de acrílico para experimentación

También se utilizaron el  $^{137}\text{Cs}$  y  $^{60}\text{Co}$  como fuentes radiactivas, la tabla 3.4 muestra la configuración de cada ensayo, donde la columna relación identifica la proporción del área de salida respecto a la

de entrada del taper, además de que identifica el nombre del ensayo que se utiliza en las gráficas de los espectros obtenidos.

Tabla 3.4. Tabla de ensayos con cambio de área de salida del taper

ENSAYO	CONFIGURACION	TIEMPO DE CONTEO	ALIMENTACION FOTOMULTIPLICADOR	RELACION (NOMBRE)	FUENTE RADIOACTIVA
1		500 s	1100 VOLTS	100% 100%-Cs	$^{137}\text{Cs}$
2		500 s	1100 VOLTS	100% 100%-Co	$^{60}\text{Co}$
3		500 s	1100 VOLTS	50% 50%-Cs	$^{137}\text{Cs}$
4		500 s	1100 VOLTS	50% 50%-Co	$^{60}\text{Co}$
5		500 s	1100 VOLTS	25% 25%-Cs 500 SEG	$^{137}\text{Cs}$
6		500 s	1100 VOLTS	25% 25%-Co 500 SEG	$^{60}\text{Co}$
7		1000 s	1100 VOLTS	25% 25%-Cs 1000 SEG	$^{137}\text{Cs}$
8		1000 s	1100 VOLTS	25% 25%-Co 1000 SEG	$^{60}\text{Co}$

En la figura 3.12 se observan los espectros obtenidos con la fuente de Cesio, en la cual, hubo una disminución en el número de cuentas, además que el pico de energía característico del espectro Compton se desplazó hacia la izquierda, disminuyendo en el valor del canal lo que significa que existió una atenuación de los fotones que entrega el plástico; incluso para la relación del 25% no se distingue adecuadamente el espectro Compton.

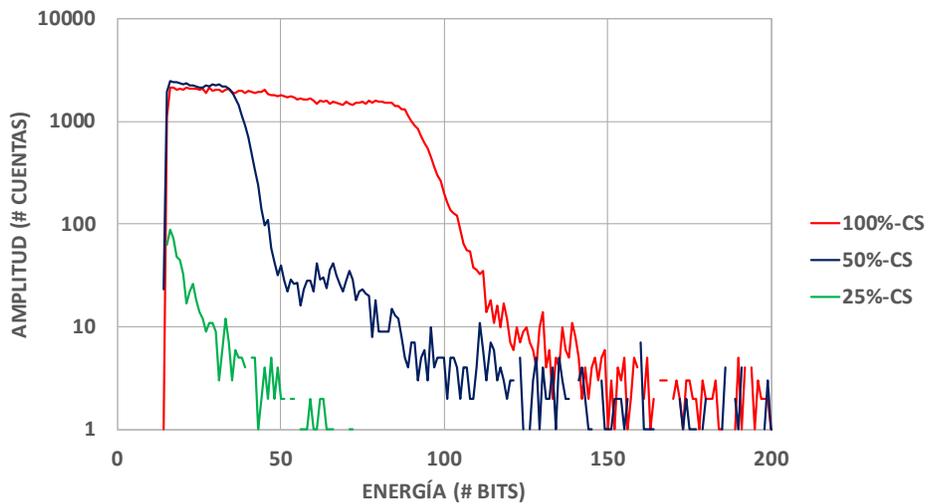


Figura 3.12. Espectro utilizando fuente de  $^{137}\text{Cs}$ .

Para la figura 3.13 se presenta la experimentación utilizando la fuente de Cobalto, de igual manera existió el fenómeno de reducción de energía de los fotones, además de que la fuente de Cobalto tiene una vida media menor, por ende la cantidad de emisión es menor, lo que provoca la falta de estadística para un espectro más definido.

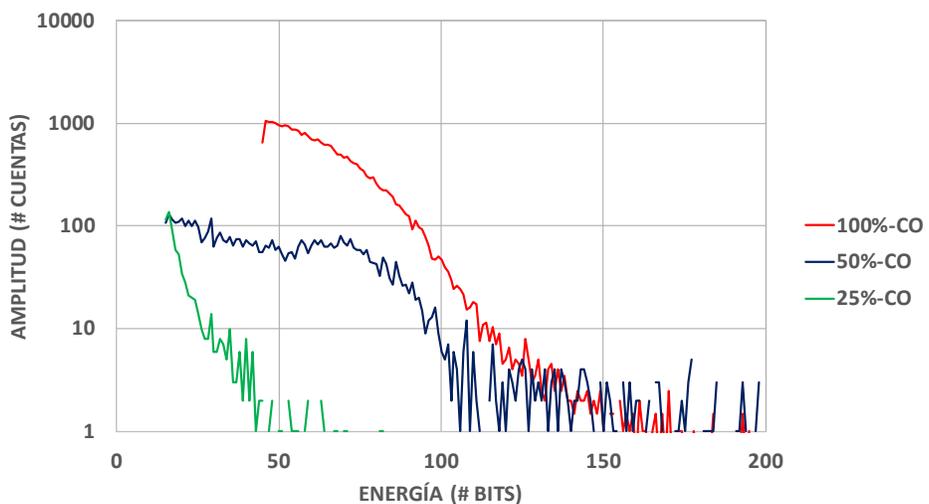


Figura 3.13. Espectro utilizando fuente de  $^{60}\text{Co}$ .

Debido a que en las ilustraciones 3.12 y 3.13, los espectros para la salida del 25% es muy pequeña, se repite el experimento aumentando el tiempo de lectura a 1000 segundos, con la intención de obtener un mayor número de pulsos que refleje una mejor estadística y que el espectro este más definido; en la figura 3.14 se observa que la diferencia al realizar los experimentos con un tiempo de 500 y 1000 segundos es mínima, lo que indica que la propagación de la señal con esta área de salida es baja en comparación a una área mayor.

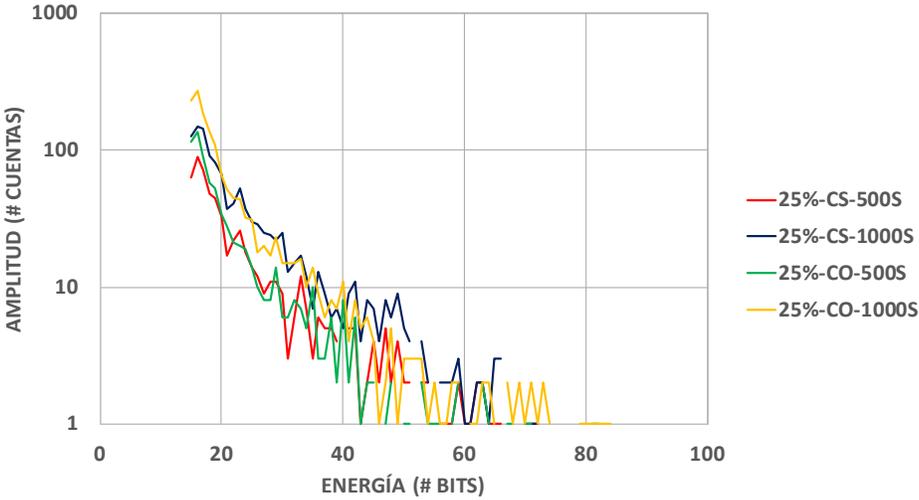
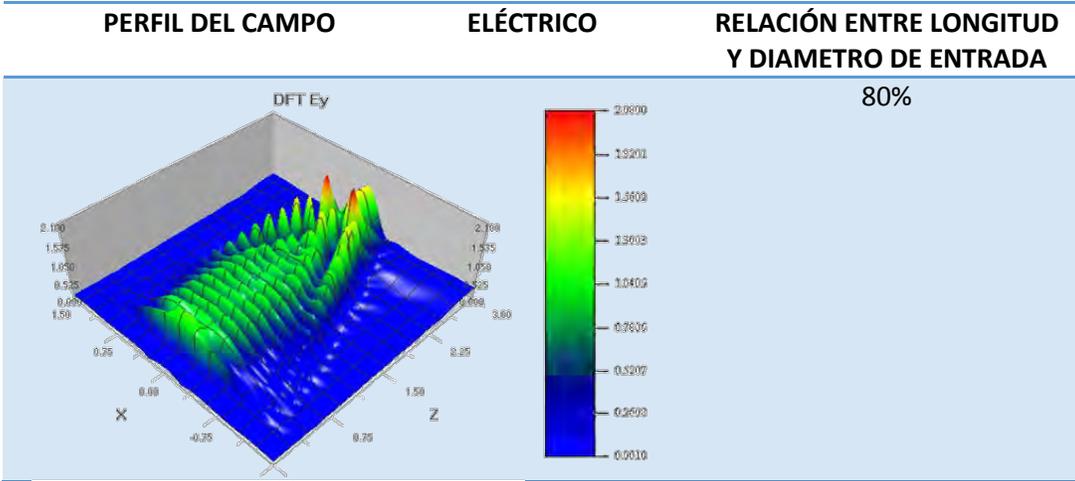


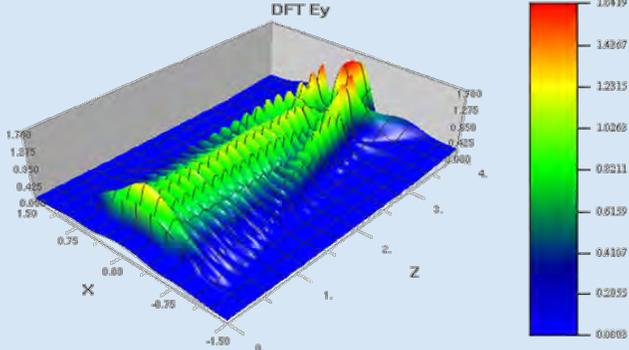
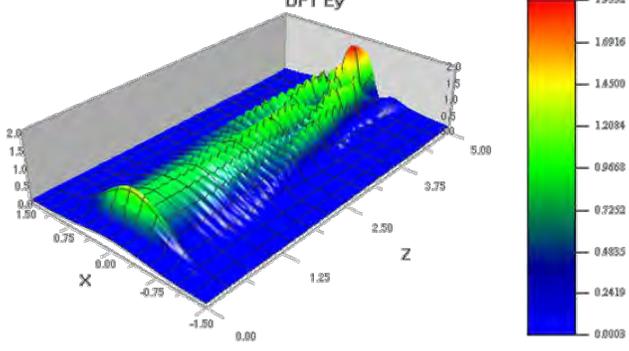
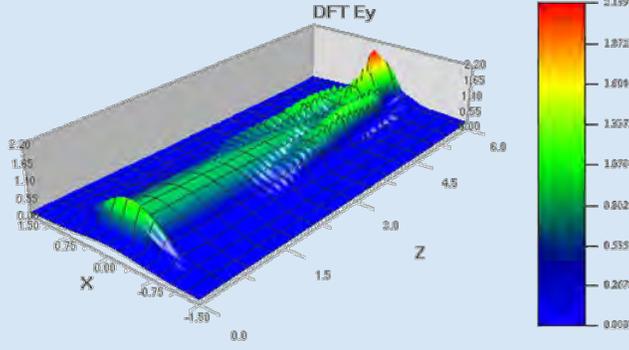
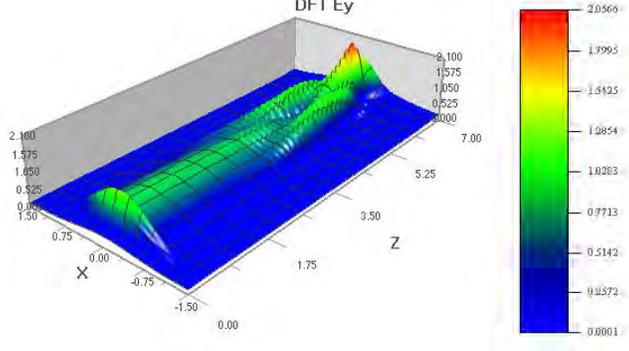
Figura 3.14. Espectro de salida con relación del 25% y diferentes tiempos de lectura

3.2.3.Cambio de longitud del plástico centellador

Para caracterizar la transmisión de los pulsos ópticos en el taper o acoplador cuando se varía la longitud a lo largo del eje de propagación; se realizó las simulaciones utilizando el software OptiFDTD, donde el área de entrada y salida del acoplador fueron constantes, el cambio de la longitud del taper se caracterizó en relación al diámetro del área de entrada; la tabla 3.5 presenta los resultados de las simulaciones al varias la longitud.

Tabla 3.5. Tabla de simulación con cambio de longitud del taper

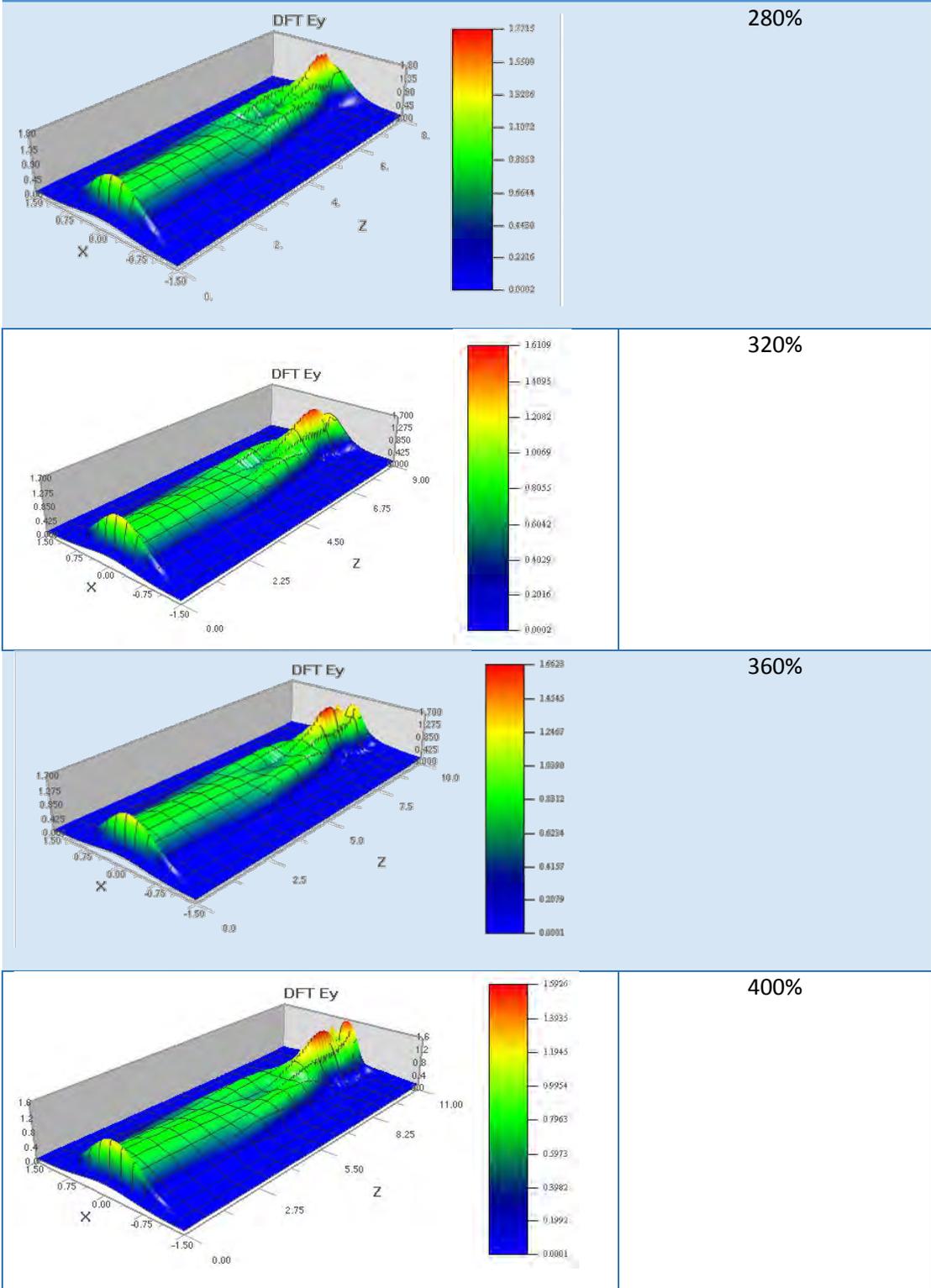


PERFIL DEL CAMPO ELÉCTRICO	RELACIÓN ENTRE LONGITUD Y DIAMETRO DE ENTRADA
	120%
	160%
	200%
	240%

**PERFIL DEL CAMPO**

**ELÉCTRICO**

**RELACIÓN ENTRE LONGITUD Y DIAMETRO DE ENTRADA**



Se observa que la propagación es semejante en las simulaciones realizadas; ya que la propagación en los espectros tiene una forma similar, sin embargo existen algunos con un pico de amplitud mayor. Además los que tienen una longitud de propagación más corta presentan un mayor campo evanescente, caso contrario para los largos, ya que su confinación es suave en toda su longitud de propagación.

De igual manera, para un realizar un análisis se comparan los espectros del campo eléctrico a la entrada y salida de propagación del taper, la figura 3.15 muestra la entrada y 3.16 la salida.

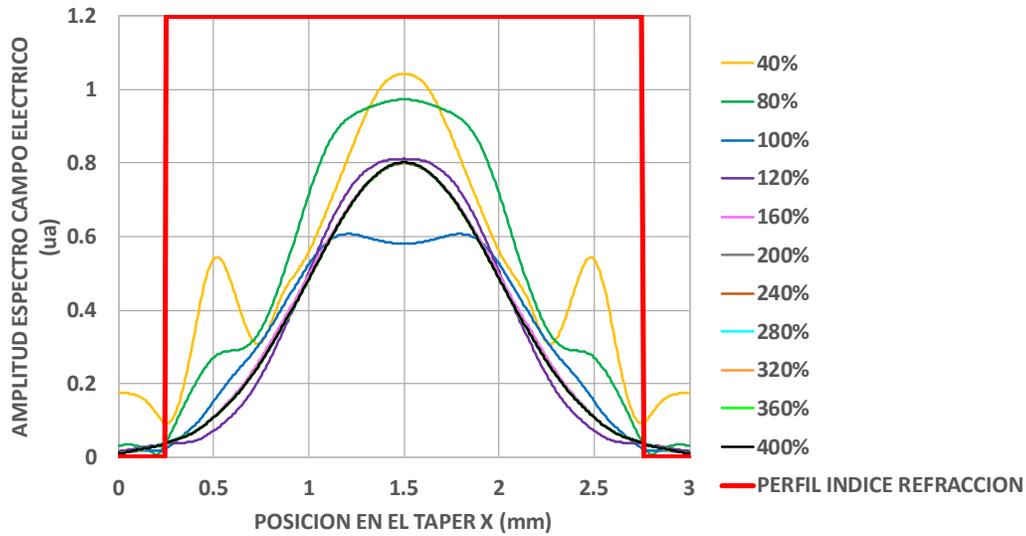


Figura 3.15. Perfil del campo eléctrico e índice de refracción a la entrada del cono con diferentes longitudes respecto al diámetro de la entrada del cono

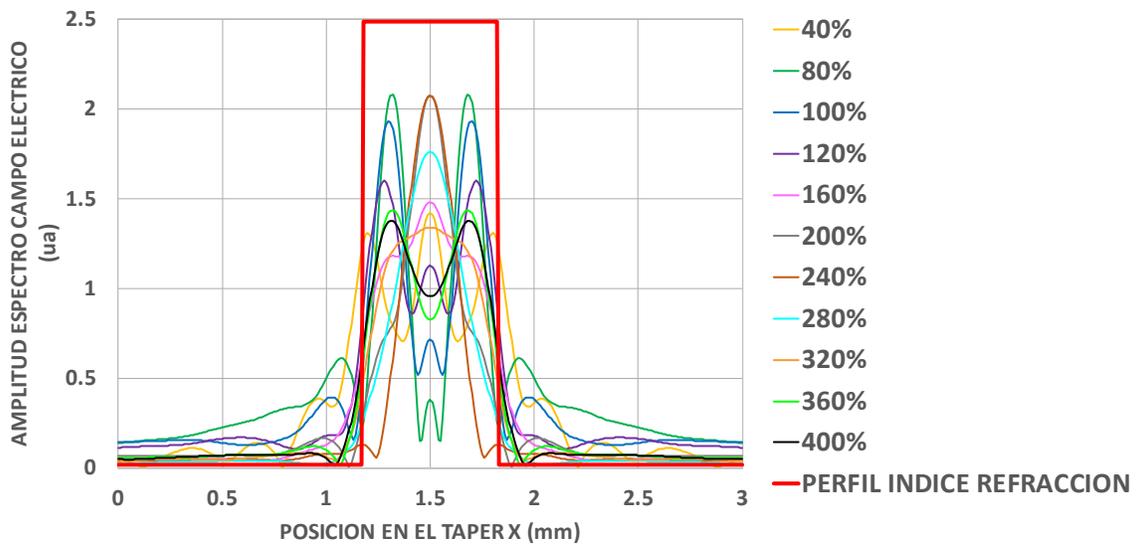


Figura 3.16. Perfil del campo eléctrico e índice de refracción a la salida del cono con diferentes longitudes respecto al diámetro de la entrada del cono

Se observa que la parte evanescente de los espectros del 40%, 80% y 100% son mayores que en los demás casos, además de que los espectros de 80% y 240% presentan picos de amplitud máxima. Sin embargo en el capítulo 4 se obtienen las integrales de los espectros para obtener el área bajo la curva del espectro dentro del perfil utilizado.

Para corroborar las simulaciones, se experimentó con un cilindro de plástico centellador NE-102 mostrado en la figura 3.3; además de tres conos de acrílico como taper, todos con un diámetro de entrada de 25 mm y diámetro de salida de 10 mm; la longitud fue variable obteniendo una relación entre la longitud y el diámetro de entrada; los acopladores utilizados se muestran en 3.17.

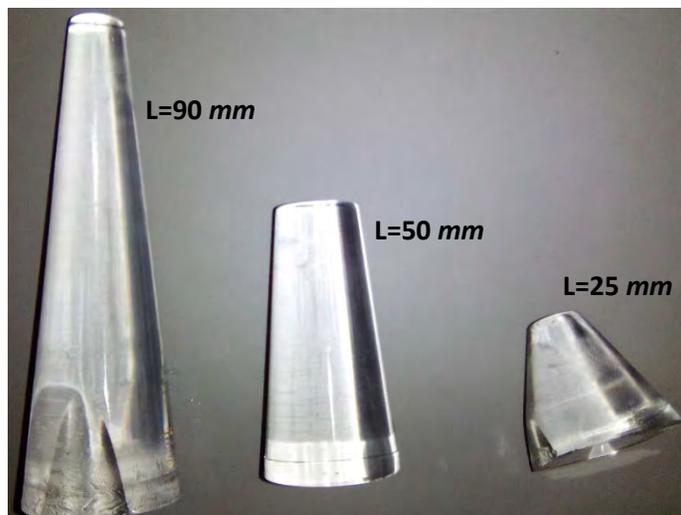
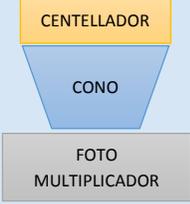
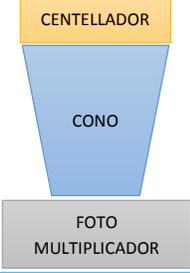
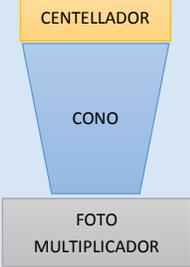


Figura 3.17. Tapers de acrílico para experimentación de longitud

En las experimentaciones se utiliza Cesio y Cobalto; la tabla 3.6 describe las características de los esquemas utilizados en cada ensayo.

Tabla 3.6. Tabla de ensayos con cambio de área de salida del taper

ENSAYO	CONFIGURACION	TIEMPO DE CONTEO	ALIMENTACION FOTOMULTIPLICADOR	RELACION NOMBRE	FUENTE RADIOACTIVA
1		500 s	1100 VOLTS	100% 100%-Cs	$^{137}\text{Cs}$
2		500 s	1100 VOLTS	100% 100%-Co	$^{60}\text{Co}$
3		500 s	1100 VOLTS	200% 200%-Cs	$^{137}\text{Cs}$

ENSAYO	CONFIGURACION	TIEMPO DE CONTEO	ALIMENTACION FOTOMULTIPLICADOR	RELACION NOMBRE	FUENTE RADIOACTIVA
4		500 s	1100 VOLTS	200% 200%-Co	$^{60}\text{Co}$
5		500 s	1100 VOLTS	360% 360%-Cs	$^{137}\text{Cs}$
6		500 s	1100 VOLTS	360% 360%-Co	$^{60}\text{Co}$

De igual manera que la simulación, el incremento en el largo del acoplador no influye demasiado como se muestra en la figura 3.18, ya que se observa que los picos de energía se encuentran muy cercanos. Sin embargo existe un menor número de cuentas conforme el acoplador era más largo, lo cual se poder atribuir a perdidas por transmisión.

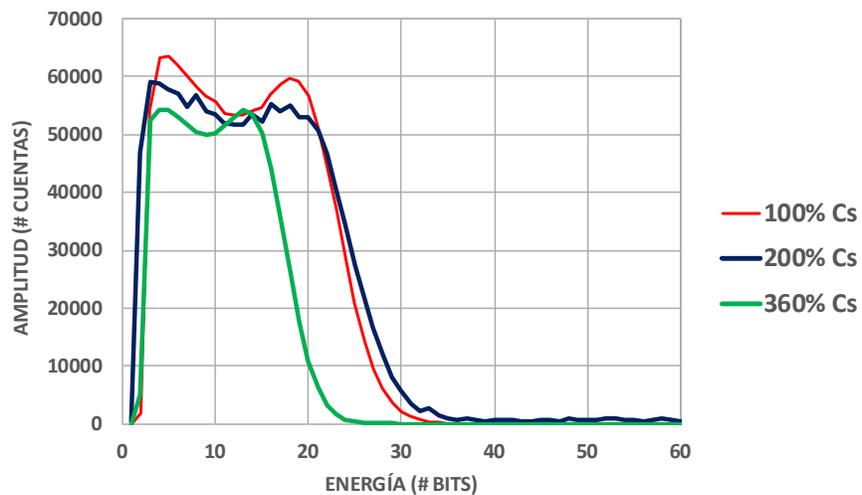


Figura 3.18. Espectro utilizando fuente de  $^{137}\text{Cs}$ .

También se presentó la misma respuesta en la figura 3.19, en la cual se presenta la experimentación utilizando fuente de Cobalto.

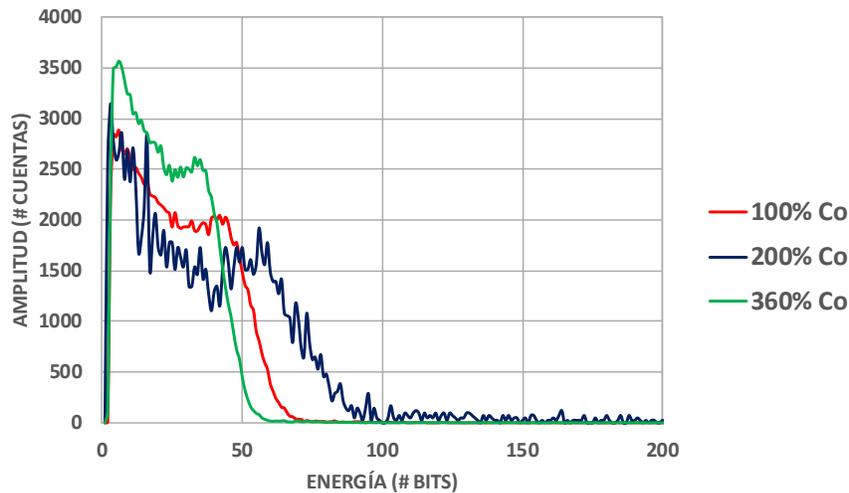


Figura 3.19. Espectro utilizando fuente de <sup>60</sup>Co.

### 3.3. Caracterización del acoplamiento óptico plástico-guía de onda

Para la caracterización del acoplamiento se utilizó dos sistemas, estos sistemas se describen a continuación:

- A. Un plástico centellador utilizado como guía de onda en forma de cilindro y acoplado a la guía de onda para realizar la propagación de la luz, mostrado en figura 3.20.

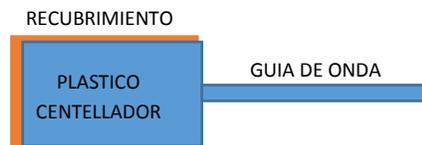


Figura 3.20. Plástico centellador como guía de onda en forma de cilindro acoplado a la fibra

- B. Un plástico centellador utilizado como guía de onda en la forma de cono truncado y acoplado a la guía de onda para la propagación de la luz, mostrado en la figura 3.21.

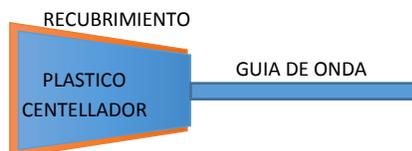


Figura 3.21. Plástico centellador como guía de onda en forma de cono truncado acoplado a la fibra

El Software Optfidd en su versión gratuita, fue utilizado para realizar las simulaciones de los dos sistemas a continuación se muestran los espectros de los campos eléctricos, observando que para

el caso del cilindro existe una relación del diámetro de salida del taper y el diámetro de entrada de la guía de onda del 40% lo que significa que existirían ciertas pérdidas por acoplamiento. En las figuras 3.22 y 3.23 se muestran los perfiles de índice de refracción utilizados en las simulaciones, donde el plástico centellador tiene un índice de refracción de 1.58 y para la guía de onda plástica el índice es 1.5

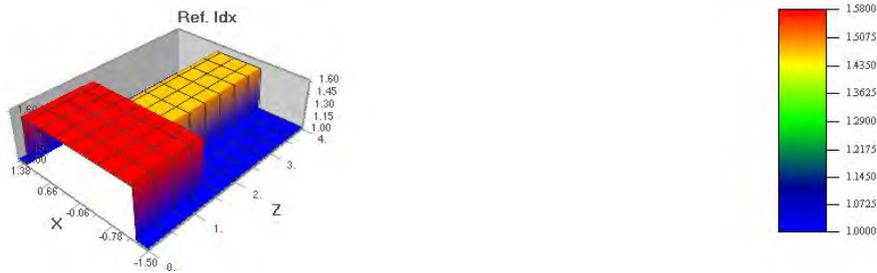


Figura 3.22. Perfil de Índices de refracción del ensamble de la fibra y un cilindro como detector

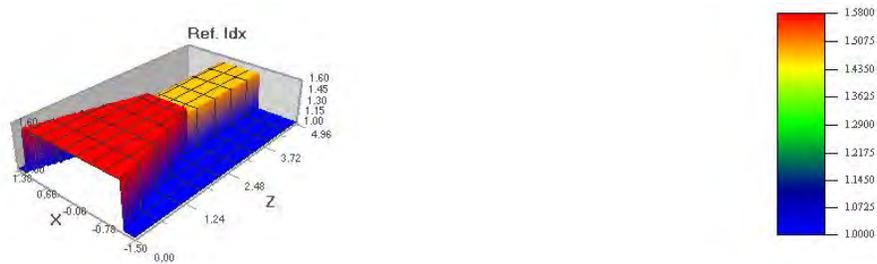
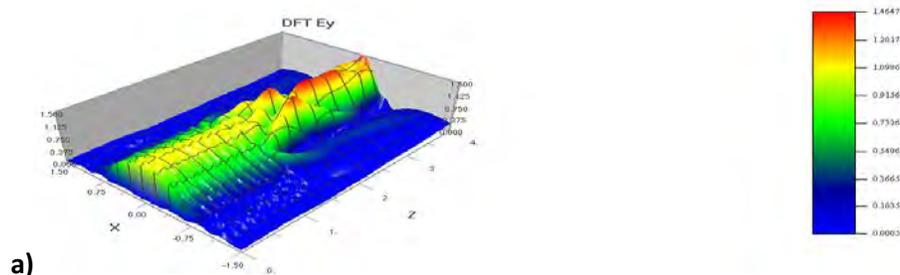


Figura 3.23. Perfil de Índices de refracción del ensamble de la guía y un cono truncado como detector

Se hizo la simulación utilizando dos perfiles de guía de onda, uno de ellos con sección circular y otro con sección cuadrada

En la figura 3.24 se muestran los espectros al utilizar el centellador en forma de cilindro y las dos secciones de guía (en el inciso **a**) con guía cuadrada y en el inciso **b**) con la guía circular), se observa que gran parte del campo se pierde al llegar a la guía de onda, además de que existe un pico de amplitud máxima en la entrada de la guía.



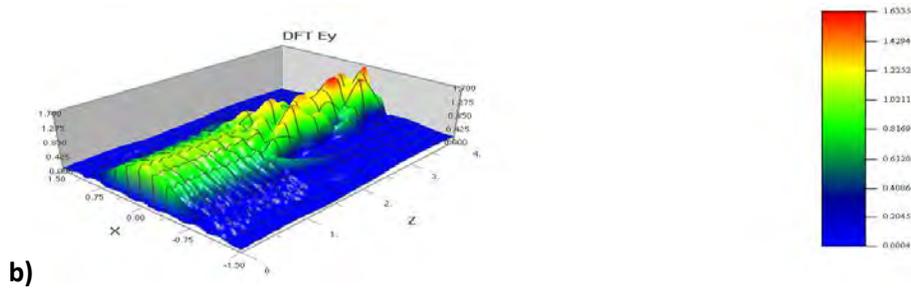


Figura 3.24. Espectro de simulación con centellador cilíndrico acoplado (a con guía cuadrada y b con guía circular)

También se simuló un centellador en forma de cono y las dos secciones de guía de onda, se observa que el espectro tiene un número mayor de pérdidas en el taper como ya se había visto en el punto 3.2.2, además en la figura 3.25 muestra que se tiene una propagación semejante para los dos tipos de secciones; incluso se observa que ambas tuvieron un mejor acoplamiento al centellador cónico.

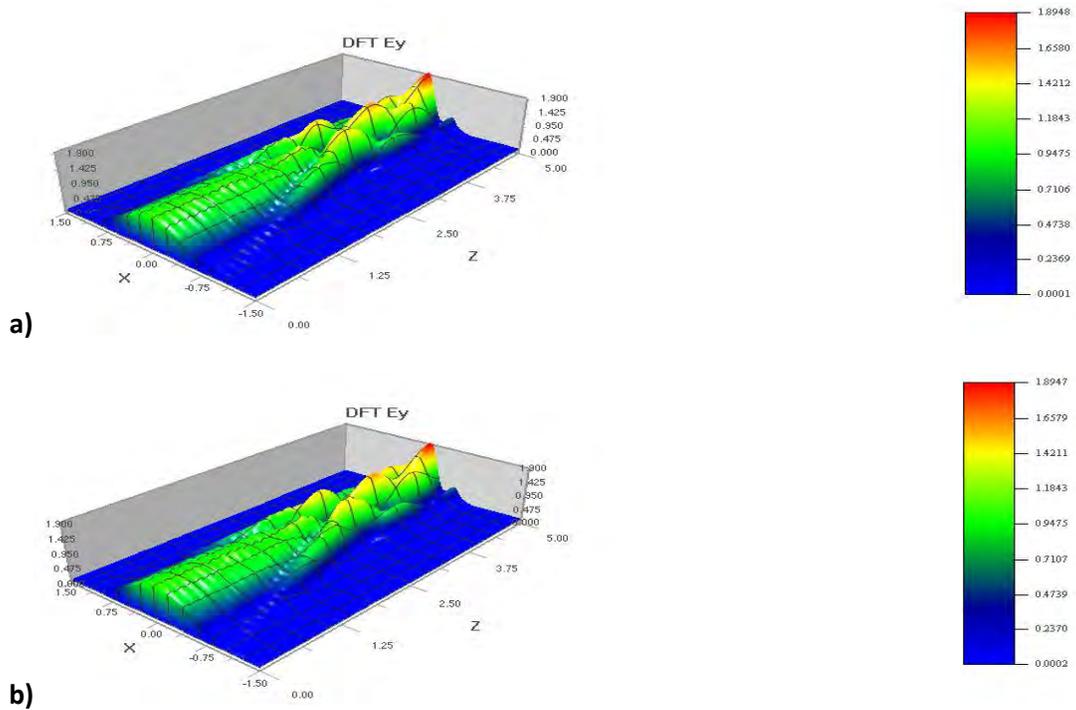


Figura 3.25. Espectro de simulación con centellador cónico acoplado (a con guía cuadrada y b con guía circular)

Al igual que en las caracterizaciones anteriores se revisan los espectros de los sistemas simulados en puntos posiciones importante del eje propagación, se revisa la entrada del taper donde se aprecia que los espectros son parecidos en forma y amplitud mostrados en la figura 3.26.

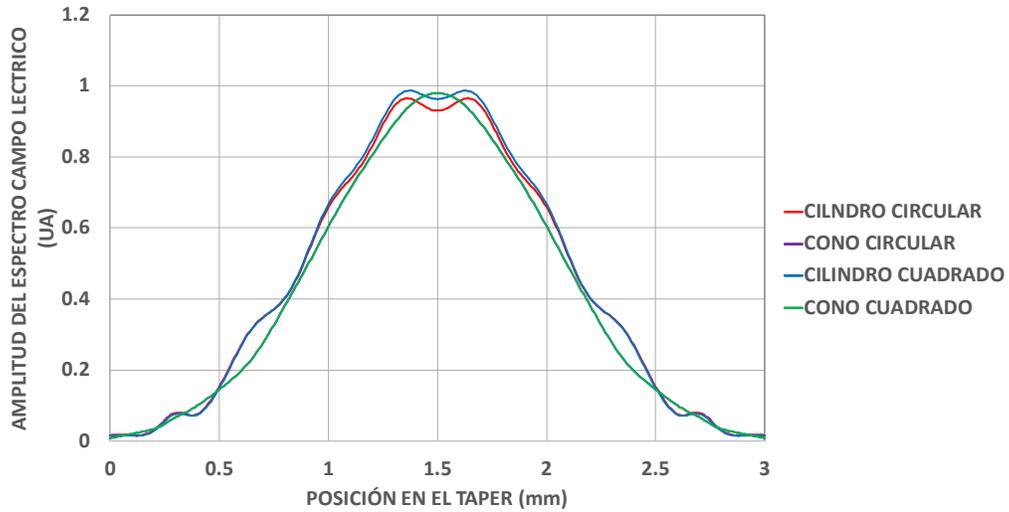


Figura 3.26. Comparación de los espectros del cilindro y cono a la entrada del taper

En la simulación se observa que en la salida del taper se tiene un espectro con mayor amplitud en el caso del cilindro.

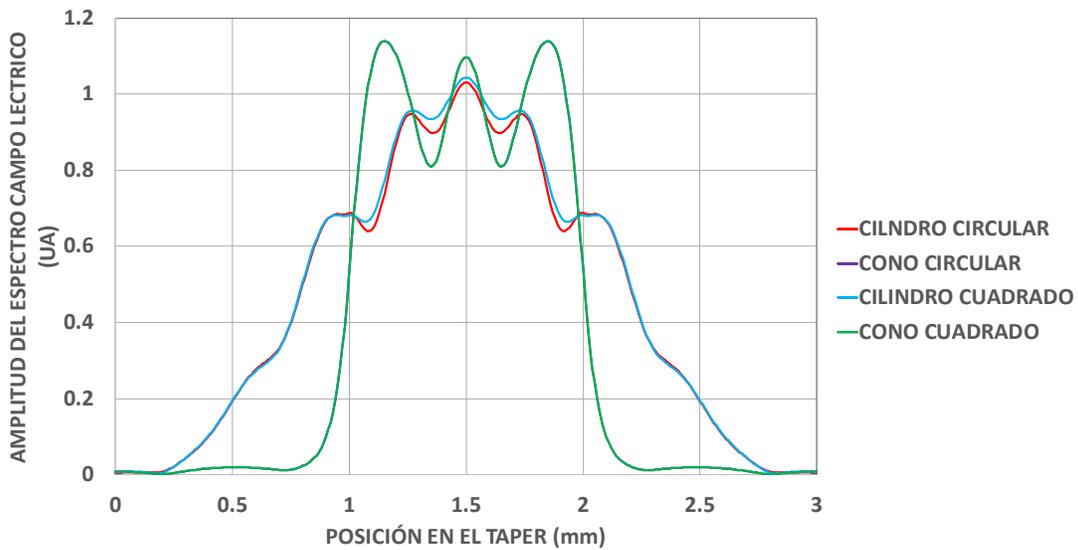


Figura 3.27. Comparación de los espectros del cilindro y cono a la salida del taper

Cuando se revisa el campo eléctrico en la entrada de la fibra como se muestra en la figura 3.28, se observa que la amplitud del campo es mayor en el caso cuando se utilizó el acoplador en forma de cono, ya que en el caso del cilindro se observa que el campo evanescente es amplio en comparación al utilizar el cono.

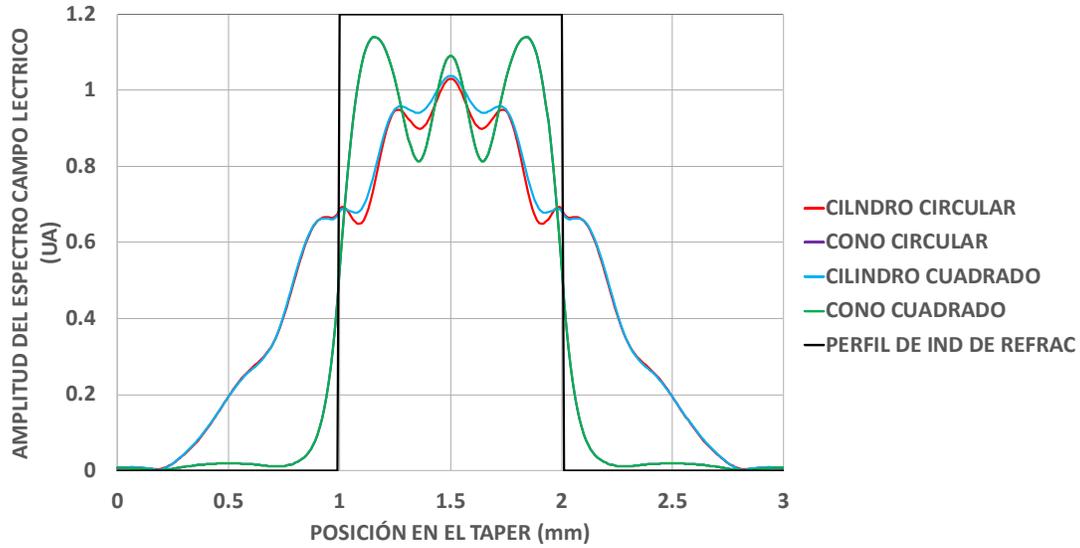


Figura 3.28. Comparación de los espectros del cilindro y cono a la entrada de la fibra

Para la figura 3.29 donde se observan los espectros en la salida de la guía de onda, la propagación a lo largo de la guía hizo que los espectros fueran muy parecidos en forma y amplitud.

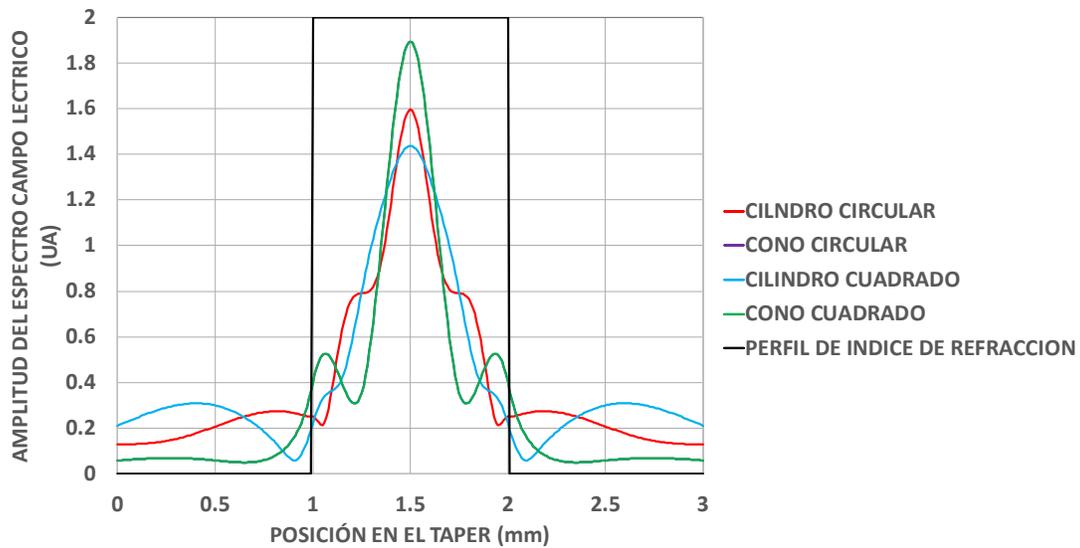


Figura 3.29. Comparación de los espectros del cilindro y cono a la salida de la guía

Para realizar la experimentación se utilizó plástico centellador NE-102, uno en forma de cilindro con un diámetro de 25 mm y longitud de 15 mm, por otro lado se utilizó un cono truncado con un diámetro mayor de 25 mm, diámetro menor de 10 mm y longitud de 25 mm, mostrados en la figura 3.30.



*Figura 3.30. Plásticos centelladores utilizados NE 102*

Debido a que no se pudo comprar la fibra óptica plástica con de 10 mm se utilizó una varilla de sección circular de acrílico de 10 mm de diámetro y se decidió utilizar también una varilla de sección cuadrangular con arista de 10 mm para realizar una comparación ya que la forma de fabricación de la varilla circular no es la que habitualmente se utiliza para la fibra óptica, ambas tienen una longitud de 250 mm; además se recubrieron de papel aluminio para generar una mayor reflexión, también se recubrieron con una cinta de aislar negra para filtrar la luz que podía incidir del exterior. La figura 3.31 muestra las dos varillas.



*Figura 3.31. Varillas de acrílico con sección circular y cuadrada*

Primero se analizaron los plásticos utilizando la guía de onda con sección circular, todos los experimentos fueron realizados con las dos fuentes radiactivas, se utilizó una alimentación de 1400 volts para alimentar el fotomultiplicador y un tiempo de conteo de 1000 segundos. En la figura 3.32 se muestra el acoplamiento de la varilla con el plástico centellador.



*Figura 3.32. Acoplamiento de la guía de onda con el plástico centellador*

En la tabla 3.7 se describen los diferentes experimentos y la configuración utilizada para la caracterización.

Tabla 3.7. Descripción de configuración para caracterizar el acoplamiento del plástico y fibra con sección circular.

ENSAYO	CONFIGURACION	FORMA PLÁSTICO	FUENTE RADIOACTIVA	NOMBRE
1		CONO	$^{137}\text{Cs}$	CON-CIR-CS
2		CONO	$^{60}\text{Co}$	CON-CIR-CO
3		CONO	SIN FUENTE	CON-CIR-SF
4		CILINDRO	$^{137}\text{Cs}$	CIL-CIR-CS
5		CILINDRO	$^{60}\text{Co}$	CIL-CIR-CO
6		CILINDRO	SIN FUENTE	CIL-CIR-SF

Primero se compara el cono y cilindro utilizando la fuente de Cesio, los espectros resultantes se muestran en la figura 3.33; donde se observa un mejor conteo utilizando el cono, con ello se comprueba las simulaciones debido a que el cono confina los pulsos de una mejor manera.

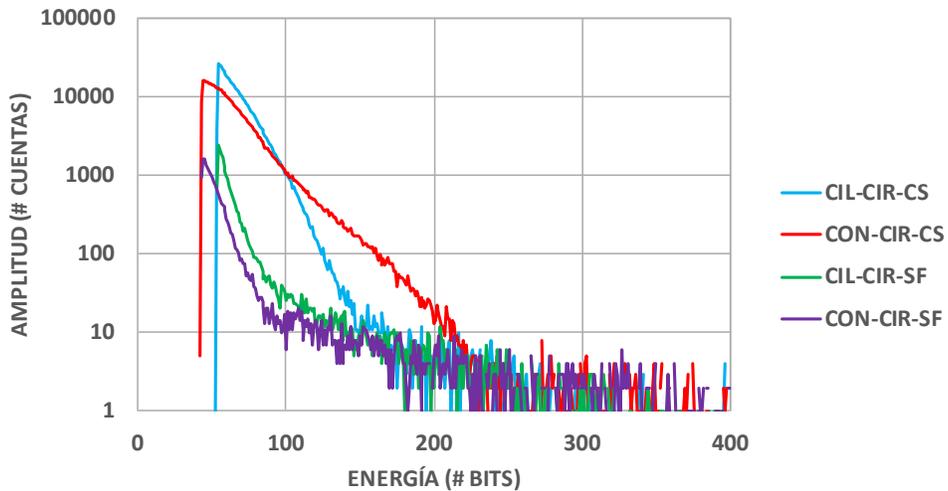


Figura 3.33. Espectro con plástico en forma de cono y cilindro utilizando la sección circular y usando  $^{137}\text{Cs}$  como fuente radiactiva

Ahora los espectros se comparan utilizando el Cobalto como fuente radiactiva, estos espectros se muestran en la figura 3.34; se observa que el espectro Compton tiene una mejor definición al utilizar el plástico con forma cónica.

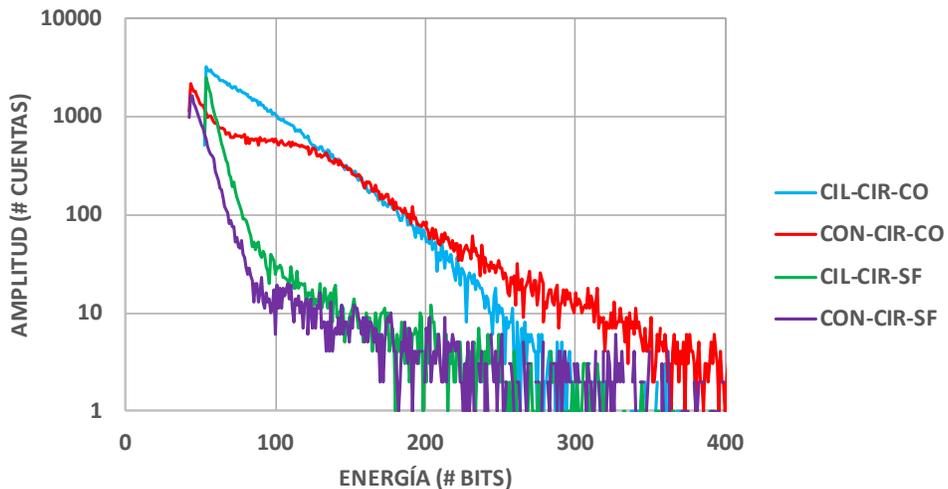


Figura 3.34 Comparación de plástico en forma de cono y cilindro utilizando la sección circular y usando  $^{60}\text{Co}$  como fuente radiactiva

Posteriormente se analizaron los plásticos utilizando la guía de onda con sección cuadrada, estos experimentos se realizaron con Cesio y Cobalto, también se utilizó un diferencial de potencia de 1400 volts para la alimentación del fotomultiplicador y un tiempo de conteo de 1000 segundos; los experimentos y configuración se describen en la tabla 3.8; en la figura 3.35 se muestra el acoplamiento con el plástico centellador.



Figura 3.35. Acoplamiento de la guía de onda cuadrada con el plástico centellador

Tabla 3.8. Descripción de configuración para caracterizar el acoplamiento del plástico y fibra con sección cuadrada.

ENSAYO	CONFIGURACION	FORMA PLÁSTICO	FUENTE RADIOACTIVA	NOMBRE
1		CONO	$^{137}\text{Cs}$	CON-CUA-CS
2		CONO	$^{60}\text{Co}$	CON-CUA-CO
3		CONO	SIN FUENTE	CON-CUA-SF
4		CILINDRO	$^{137}\text{Cs}$	CIL-CUA-CS
5		CILINDRO	$^{60}\text{Co}$	CIL-CUA-CO
6		CILINDRO	SIN FUENTE	CIL-CUA-SF

Se realiza el análisis del plástico con la guía cuadrada utilizando la fuente de Cesio, los espectros se muestran en la figura 3.36; para estos espectros se puede observar que el plástico con forma cónica tiene un espectro mejor definido, además tiene un mayor número de cuentas.

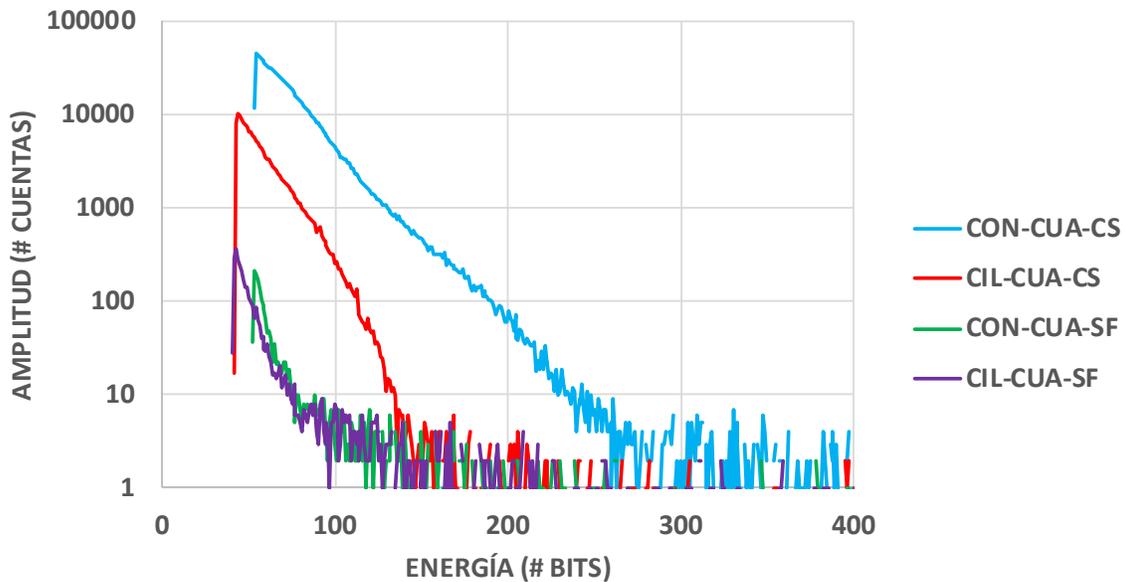


Figura 3.36. Espectros del plástico en forma de cono y cilindro utilizando la sección cuadrada y usando  $^{137}\text{Cs}$  como fuente radiactiva

Al utilizar Cobalto como fuente radiactiva, se obtienen los espectros mostrados en la figura 3.37; donde el espectro Compton tiene una mejor definición cuando se utilizó el plástico con forma de cono, incluso tiene un mayor número de cuentas.

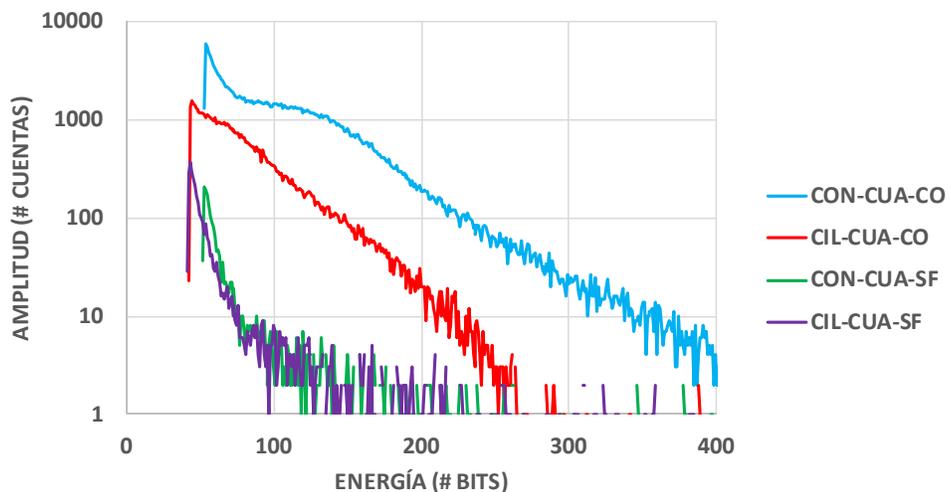


Figura 3.37. Espectros del plástico en forma de cono y cilindro utilizando la sección cuadrada y usando  $^{60}\text{Co}$  como fuente radiactiva

### 3.4. Caracterización de la guía de onda.

#### 3.4.1. Caracterización de la forma de la sección transversal de la guía de onda

Se realizó la experimentación para la caracterización de una guía de onda con sección circular y cuadrada; con ello analizar cual tiene mejor transmisión, además se utilizó plástico centellador NE 102 descritos en la sección 3.2.

Para las guías ópticas se utilizó una varilla de sección circular de acrílico de 10 mm de diámetro y una varilla de sección cuadrangular con arista de 10 mm.

El primer análisis fue utilizando el plástico centellador en forma de cilindro, los experimentos fueron realizados con dos fuentes radiactivas, además de utilizar diferencial de potencial de 1400 volts para alimentar el fotomultiplicador y un tiempo de conteo de 1000 segundos; en la tabla 3.9 se describen los diferentes experimentos y la configuración realizada.

Tabla 3.9. Descripción de configuración para caracterizar la guía de onda utilizando el plástico en forma de cilindro

ENSAYO	CONFIGURACION	SECCION TRANVERSAL	FUENTE RADIOACTIVA	NOMBRE
1		CIRCULAR	$^{137}\text{Cs}$	CIL-CIR-CS
2		CIRCULAR	$^{60}\text{Co}$	CIL-CIR-CO
3		CIRCULAR	SIN FUENTE	CIL-CIR-SF
4		CUADRADA	$^{137}\text{Cs}$	CIL-CUA-CS
5		CUADRADA	$^{60}\text{Co}$	CIL-CUA-CO
6		CUADRADA	SIN FUENTE	CIL-CUA-SF

En el análisis con el plástico en forma de cilindro se divide en dos partes, la primera es utilizando la fuente de Cesio, donde se obtuvo los espectros de la figura 3.38, para ambas varillas se tiene la misma forma solo aumento el número de cuentas para la varilla circular.

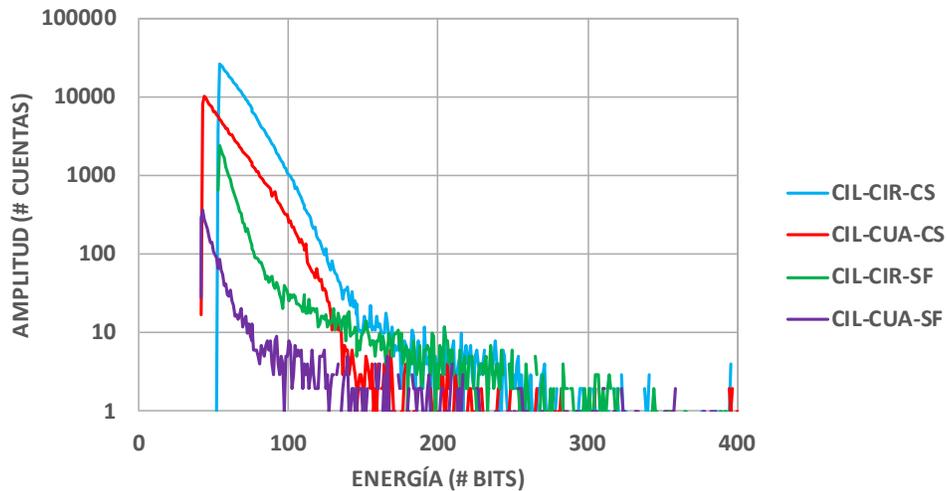


Figura 3.38. Comparación de sección cuadrada y circular utilizando el plástico en forma de cilindro y usando  $^{137}\text{Cs}$  como fuente radiactiva

En el segundo análisis se utilizó el Cobalto donde se obtuvieron los espectros de la figura 3.39; los espectros con fuente tienen la misma forma, la única diferencia es que el que se obtuvo utilizando la varilla circular tuvo más número de cuentas.

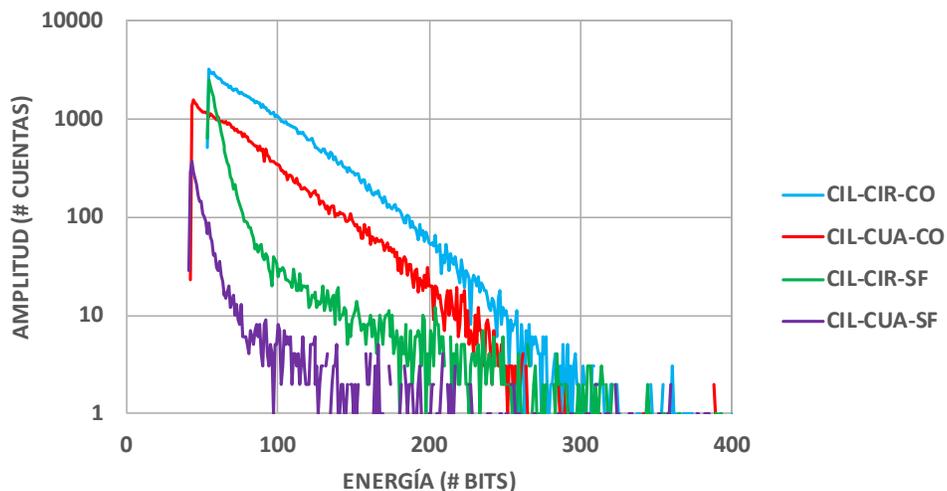
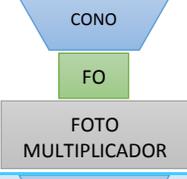


Figura 3.39. Comparación de sección cuadrada y circular utilizando el plástico en forma de cilindro y usando  $^{60}\text{Co}$  como fuente radiactiva

Por lo tanto para ambos casos se describe que la varilla con sección circular tiene un mejor comportamiento, lo que significa que el acoplamiento con las formas circulares es mejor.

Si bien ya se tiene resultados de las varillas, ahora se obtendrán espectros utilizando un plástico centellador que tiene una forma de cono, para estas experimentaciones se utilizó un voltaje de alimentación del fotomultiplicador de 1400 volts; además se programó en el analizador multicanal con un tiempo de conteo de 1000 segundos, para estas experimentaciones se utilizaron dos fuentes radiactivas; en la tabla 3.10 se describen los diferentes experimentos y la configuración realizada. La columna con el encabezado de nombre es la nomenclatura que se utilizó para identificar cada uno de los experimentos en las gráficas de los espectros que se obtuvieron, estas figuras son mostradas posteriormente.

Tabla 3.10. Descripción de configuración para caracterizar la guía de onda utilizando el plástico en forma de cono

ENSAYO	CONFIGURACION	SECCION TRANSVERSAL	FUENTE RADIOACTIVA	NOMBRE
1		CIRCULAR	$^{137}\text{Cs}$	CON-CIR-CS
2		CIRCULAR	$^{60}\text{Co}$	CON-CIR-CO
3		CIRCULAR	SIN FUENTE	CON-CIR-SF
4		CUADRADA	$^{137}\text{Cs}$	CON-CUA-CS
5		CUADRADA	$^{60}\text{Co}$	CON-CUA-CO
6		CUADRADA	SIN FUENTE	CON-CUA-SF

El análisis con el plástico en forma de cono de igual manera se divide en dos partes, la primera se realizó utilizando una fuente radiactiva de Cesio.

Los espectros resultantes de la figura 3.40, muestran el número de cuentas obtenido por cada energía, se observa que utilizando el Cesio se tienen espectros parecidos, sin embargo la guía con sección cuadrada proporcionó un mayor número de cuentas.

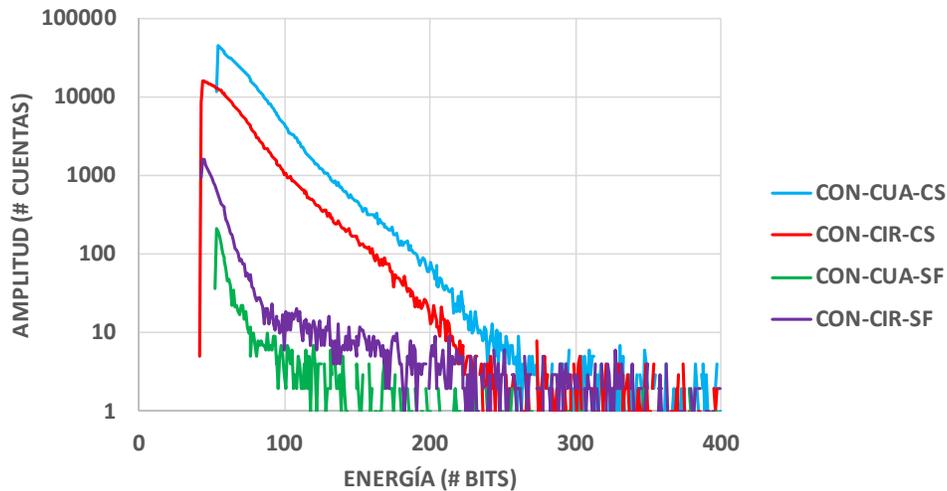


Figura 3.40. Comparación de sección cuadrada y circular utilizando el plástico en forma de cono y usando  $^{137}\text{Cs}$  como fuente radiactiva

Al utilizar una fuente de Cobalto se obtuvieron espectros parecidos en forma como se observa en la figura 3.41; sin embargo con la guía de onda de sección cuada se generó un mayor número de cuentas.

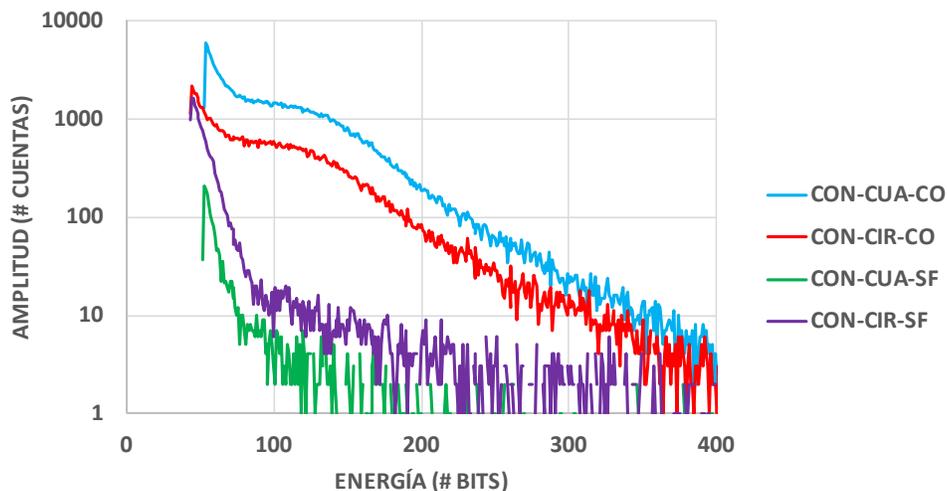


Figura 3.41. Comparación de sección cuadrada y circular utilizando el plástico en forma de cono y usando  $^{60}\text{Co}$  como fuente radiactiva

Se puede concluir que al utilizar un plástico centellador en forma de cono, la guía de onda con sección cuadrada genere un mayor número de cuentas, en comparación de utilizar la sección circular.

### 3.4.2. Caracterización de las pérdidas por propagación en longitud de la guía de onda

Se realizaron los experimentos para la caracterización de una guía de onda cuadrada; con ello analizar las pérdidas de propagación que se generan por la distancia recorrida, además se utilizó plástico centellador NE 102 descritos en la sección 3.2.

Se utilizó una varilla de sección cuadrangular con arista de 10 mm.

Se utilizó el plástico centellador en forma de cono, la configuración de alimentación del fotomultiplicador fue de 1400 volts de corriente directa y el tiempo de conteo utilizado fue de 1000 segundos, además de utilizar las dos fuentes radiactivas; en la tabla 3.11 se describen los diferentes experimentos y la configuración realizada.

Tabla 3.11. Descripción de configuración de experimentación para caracterizar las pérdidas por propagación

ENSAYO	CONFIGURACION	DISTANCIAD E LA GUIA	FUENTE RADIOACTIVA	NOMBRE
1		25 cm	$^{137}\text{Cs}$	Cs-25cm
2		25 cm	$^{60}\text{Co}$	Co-25cm
4		50 cm	$^{137}\text{Cs}$	Cs-50cm
5		50 cm	$^{60}\text{Co}$	Co-50cm

El análisis con el plástico se divide en dos partes la primera es utilizando la fuente de Cesio, mostrando los espectros en la figura 3.42; para la segunda parte donde se utilizó el Cobalto los espectros son presentados en la figura 3.43; para ambos casos se describe que a mayor distancia de recorrido se tiene una mayor pérdida por propagación de la onda.

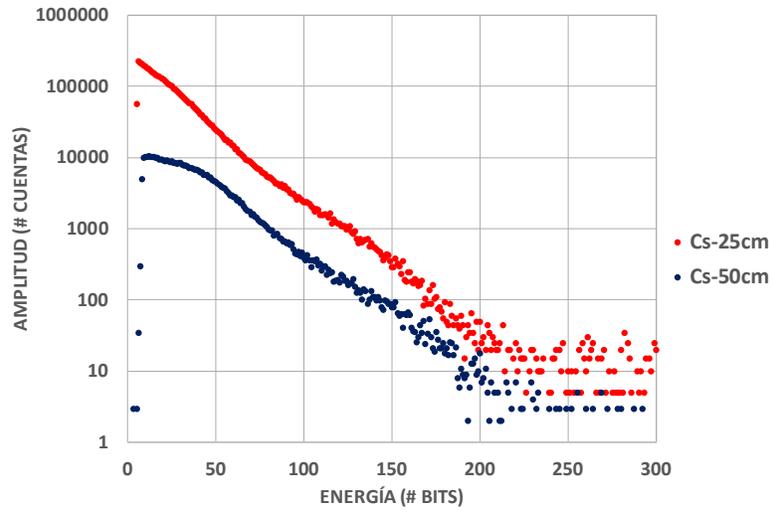


Figura 3.42. Comparación de sección cuadrada y circular utilizando el plástico en forma de cono y usando  $^{137}\text{Cs}$  como fuente radiactiva

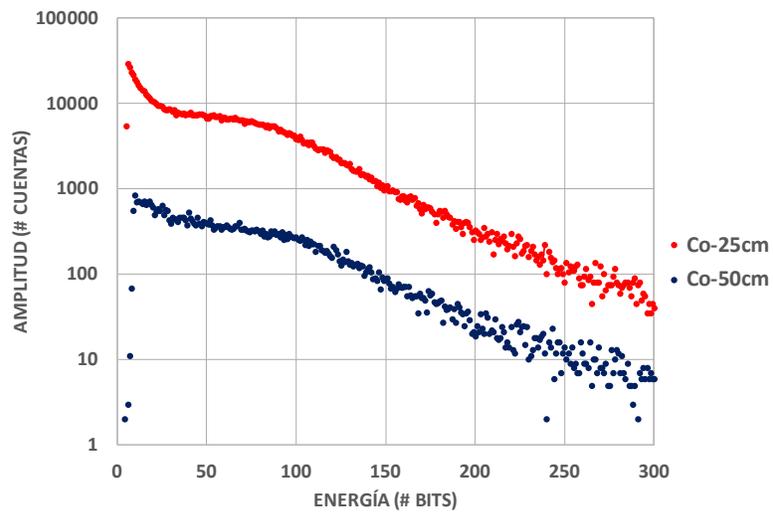


Figura 3.43. Comparación de sección cuadrada y circular utilizando el plástico en forma de cono y usando  $^{60}\text{Co}$  como fuente radiactiva

## 4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

### 4.1. Caracterización del plástico centellador

#### 4.1.1. Eficiencia del detector

Como resultado de la eficiencia del detector se observa que con una cantidad mayor de material centellador la eficiencia aumentaría y con ello el número de pulsos, como se muestra en la figura 4.1, lo que significa que al tener una mayor cantidad de material, este debe ser utilizado de forma eficiente para tener la menor cantidad de pérdidas por propagación. También es importante tener presente que una mayor cantidad de material implica un mayor costo.

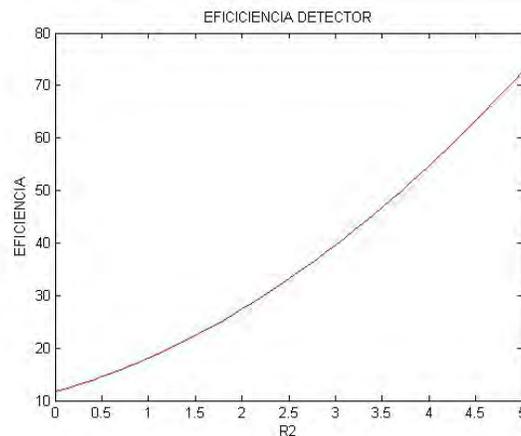


Figura 4.1. Simulación de la eficiencia del plástico

Para corroborar la simulación se presenta el número de pulsos totales que se obtuvo en las seis experimentaciones descritas en el punto 3.2.1, la figura 4.2 muestra la cantidad de pulsos, en los experimentos se utilizó el plástico en forma de cono, cilindro y la unión de ambos, además de utilizar el Cesio y Cobalto; se observa que con la unión del cono y el cilindro el resultado del total de pulsos fue la suma de los pulsos cuando se experimentó por separado y solos.

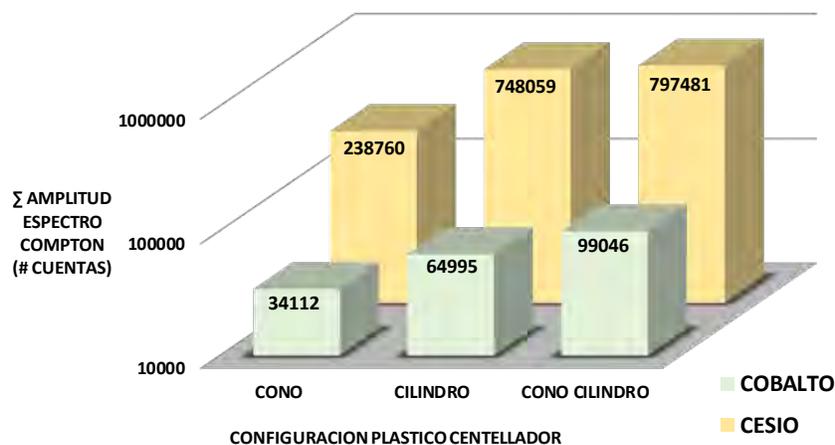


Figura 4.2. Resultado de experimentación para caracterización de eficiencia

#### 4.1.2. Variación de área de salida del plástico centellador

Se presenta los resultados resumidos de las experimentaciones descritas en el punto 3.2.2 donde se varió el diámetro del área de salida de una taper en forma de cono truncado. En la figura 4.3 se observa que entre más parecido se tenga un cono a un cilindro se tendrá un espectro de salida con mayor energía lo que significa que al realizar una confinación se tiene pérdidas.

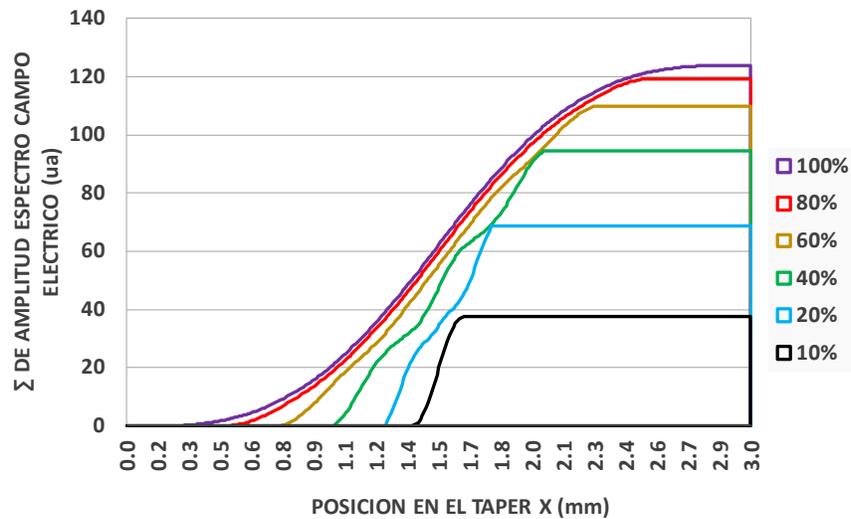


Figura 4.3. Sumatoria de las amplitudes del campo eléctrico a la salida del taper para cada relación.

Para realizar un mejor análisis se presenta la figura 4.4, la cual muestra las integrales de los espectros del campo eléctrico en la salida del taper, en ella se aprecia que entre mayor sea el área de salida se tiene una amplitud mayor, sin embargo al tener una área mayor de salida del taper que el área de entrada de la guía se tendrán pérdidas por acoplamiento debido a la diferencia de las áreas de los dispositivos ópticos como se muestra en el punto 4.2.

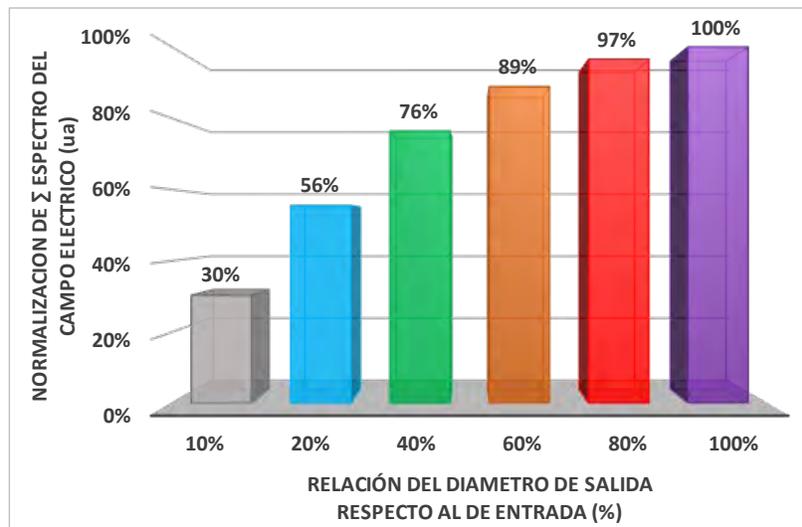


Figura 4.4. Se grafican los totales de cada caso a la salida del taper.

Para ratificar la simulación se realizó la experimentación cambiando el área de salida de un taper; con un 25%, 50% y 100% del diámetro del área de salida respecto al diámetro del área de entrada,

la figura 4.5 muestra la cantidad de pulsos obtenidos experimentalmente utilizando la fuente de Cesio y Cobalto; se observa que entre mayor sea el diámetro a la salida respecto al de la entrada obtendremos una mejor respuesta del detector.

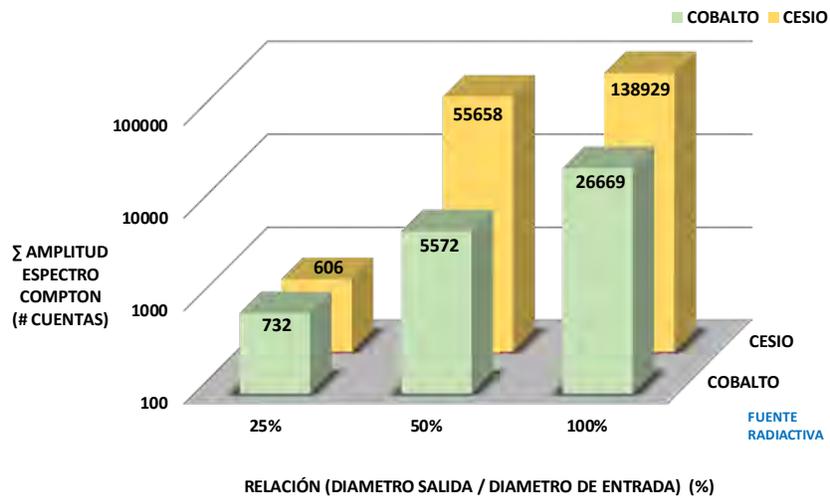


Figura 4.5. Resultado de experimentación para caracterización del área de salida

#### 4.1.3. Cambio de longitud del plástico centellador

En la figura 4.6 se presenta el resultado resumido de las simulaciones realizadas en el punto 3.2.3, mostrando el valor del área bajo la curva de los espectros del campo eléctrico a la salida del taper, la variable utilizada fue la longitud del cono truncado respecto al diámetro del área de entrada. Se observa que para la relación de 100% y 120% se obtuvo un mejor comportamiento en el taper.

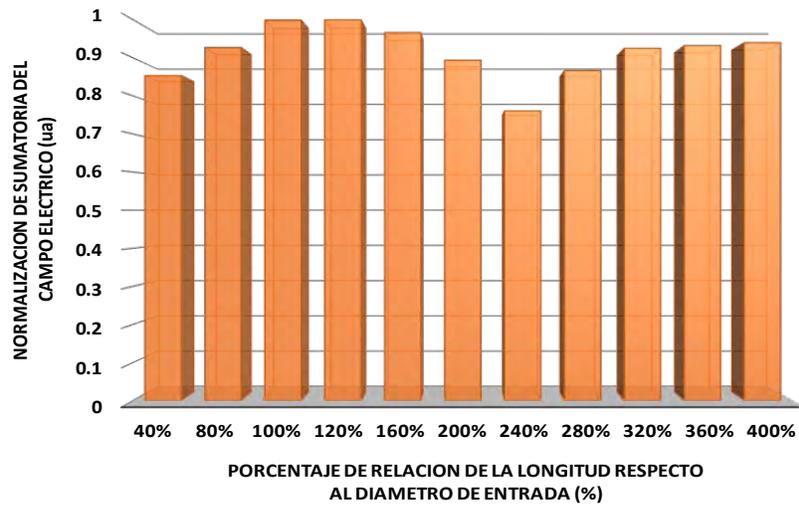


Figura 4.6. Sumatoria total del espectro de campo eléctrico al variar la longitud del taper

Para comparar los resultados obtenidos en la simulación se muestran los resultados de la experimentación donde se varió la longitud del taper, con 100%, 200% y 360% de relación de la longitud respecto al diámetro del área de entrada, la figura 4.7 muestra la cantidad de pulsos

obtenidos experimentalmente utilizando la fuente de Cesio y Cobalto; se observa que el número de pulsos son muy parecidos no existe gran discrepancia, salvo cuando se utilizó el cesio con el taper más largo, posiblemente por las pérdidas de propagación que existen por la longitud, en comparación a la simulación en la cual el sistema es ideal.

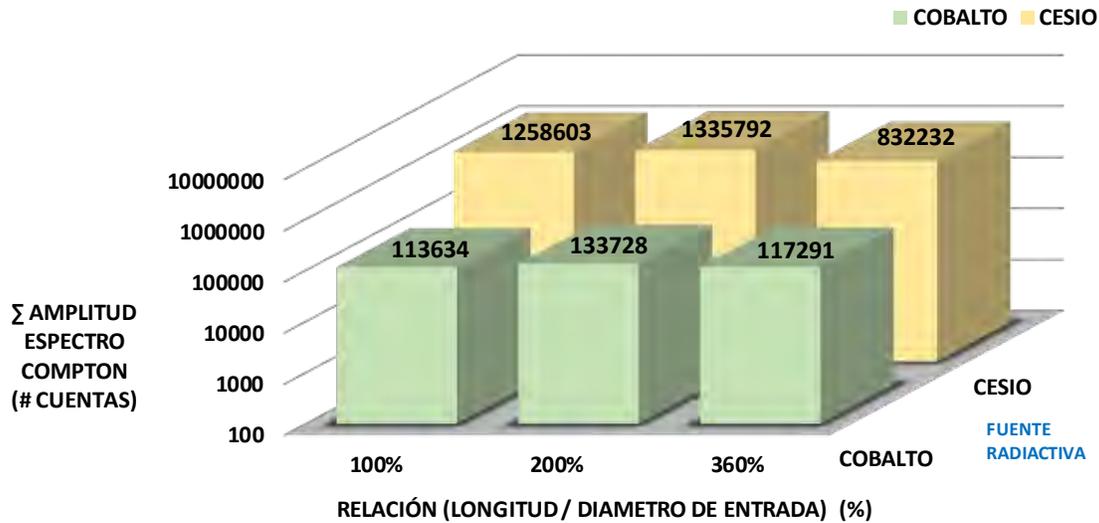


Figura 4.7. Resultado de experimentación para caracterización del área de salida

#### 4.2. Caracterización del acoplamiento óptico plástico-guía de onda

El resultado resumido del comportamiento de las simulaciones del punto 3.3, mostrando el área bajo la curva de los espectros del campo eléctrico, estas áreas muestran la salida de los tapers y las entradas hacia la guía de onda. La figura 4.8 muestra que la sumatoria del espectro a la entrada de la guía del sistema es mayor para los que utilizaron el cono, lo que significa que este dispositivo óptico confina la luz de una manera más eficiente.

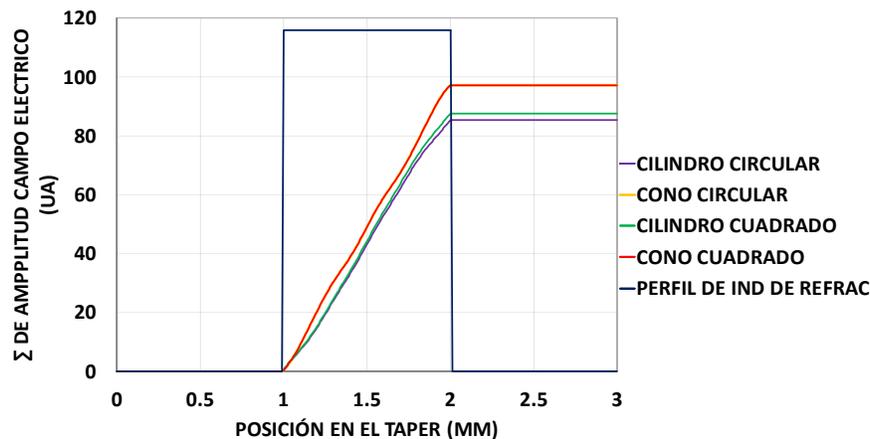


Figura 4.8. Sumatoria del espectro de campo eléctrico a lo largo del eje x con los acoplamientos simulados

En la figura 4.9 se presenta el comportamiento que tuvo el campo eléctrico a lo largo del sistema para los cuatro sistemas simulados, el comportamiento muestra que el cilindro tiene mayor integral a su salida en comparación al cono, sin embargo el cono confina esa energía de mejor manera para que sea recibida por la guía de onda y con ello a la salida de la guía de onda se tenga un mejor funcionamiento en el sistema del cono que el cilindro.

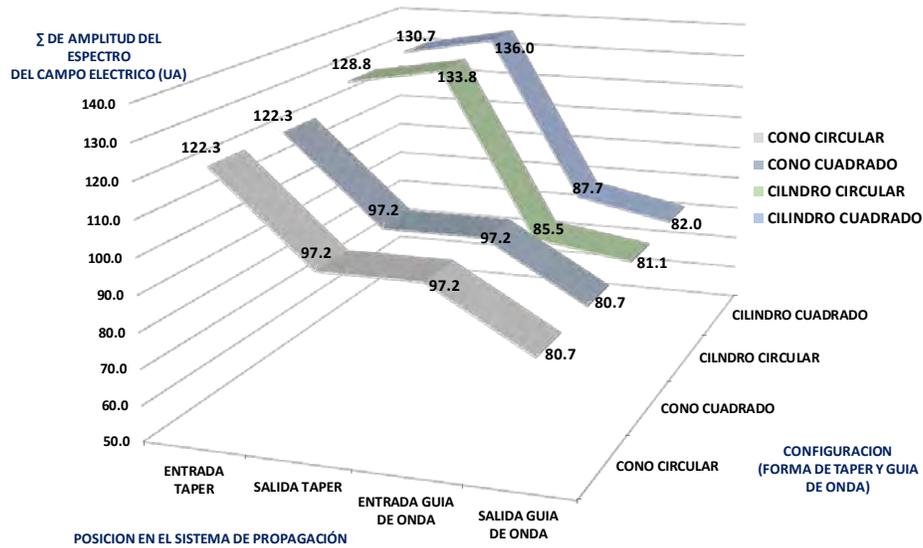


Figura 4.9. Comportamiento del campo eléctrico a lo largo de los sistemas de acoplamientos simulados

Para la experimentación se presenta el número de cuentas totales para cada configuración que se realizó; donde la figura 4.10 muestra el acoplamiento del cono y cilindro con una sección circular de la guía de onda tienen muy parecidos el número de cuentas, sin embargo los espectros utilizando el cono de las ilustraciones 3.32 y 3.33 tienen forma con mayor eficiencia en comparación del realizado en el cilindro.

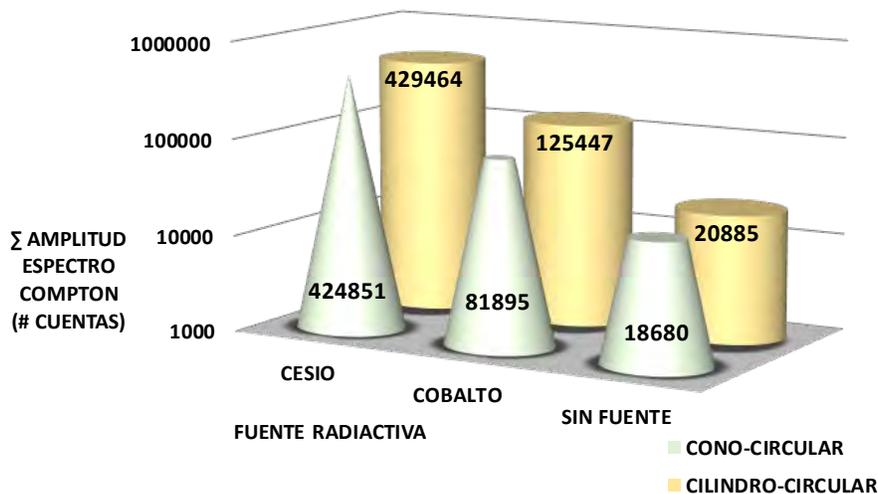


Figura 4.10. Cuentas totales en experimentación del cilindro y cono acoplado a una guía de onda.

Cuando se utilizó la guía de onda cuadra se obtuvo una diferencia mayor en el total de cuentas para los sistemas utilizando el cono y el cilindro, donde de nueva cuenta el cono obtuvo un mejor comportamiento respecto a su disidente lo cual se muestra en la figura 4.11.

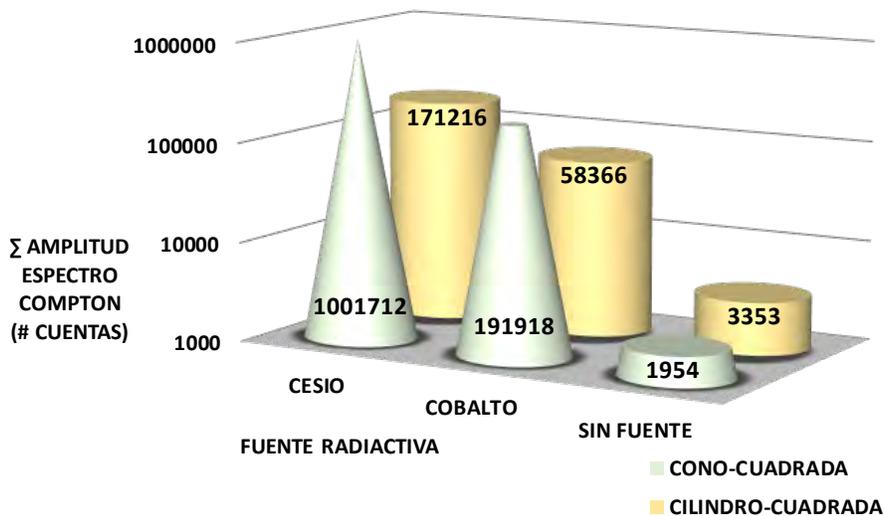


Figura 4.11. Cuentas totales en experimentación del cilindro y cono acoplado a una guía de onda cuadrada.

### 4.3. Caracterización de la guía de onda.

#### 4.3.1. Caracterización de la forma de la sección transversal de la guía de onda

Se presentan los resultados resumidos de las experimentaciones descritas en el punto 3.4.1, donde se muestra el número total de cuentas obtenidas en cada uno de las configuraciones analizadas, en la figura 4.12 se observa que en un taper en forma de cilindro la guía circular obtuvo un mejor comportamiento, aunque la forma de los espectros presentados en las figuras 3.37 y 3.38 son semejantes, el número total de cuentas tiene una proporción del doble.

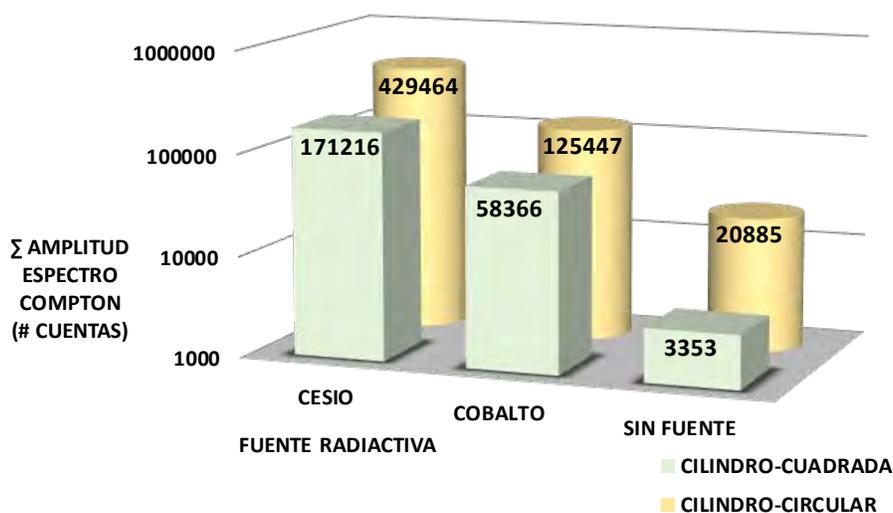


Figura 4.12. No. de cuentas totales con un plástico cilíndrico acoplado a guía de onda cuadrada y circular.

En la figura 4.13 se comparan los sistemas que utilizaron el cono, la guía de onda cuadrada obtuvo un mejor número de cuentas, de igual manera en las figuras 3.39 y 3.40 los espectros son semejantes, pero el número de cuentas para la guía cuadrada tiene el doble que para la guía circular.

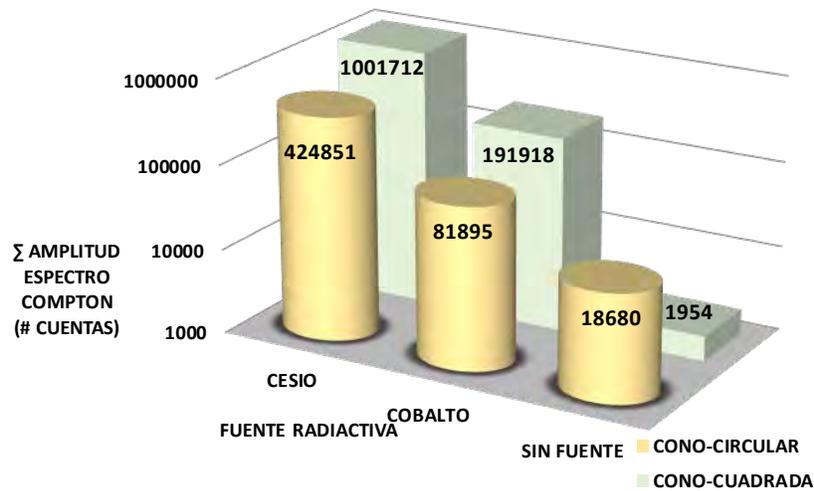


Figura 4.13. No. de cuentas totales con un plástico cónico acoplado a guía de onda cuadra y circular.

4.3.2. Caracterización de las pérdidas por propagación en longitud de la guía de onda  
 Se presentan los resultados resumidos de las experimentaciones referidas en el punto 3.4.2, donde se muestra el número total de cuentas obtenidas en cada uno de las configuraciones analizadas, en la figura 4.14 se muestra claramente que existe una mayor pérdida de propagación cuando la distancia de recorrido es mayor en ambas fuentes radiactivas.

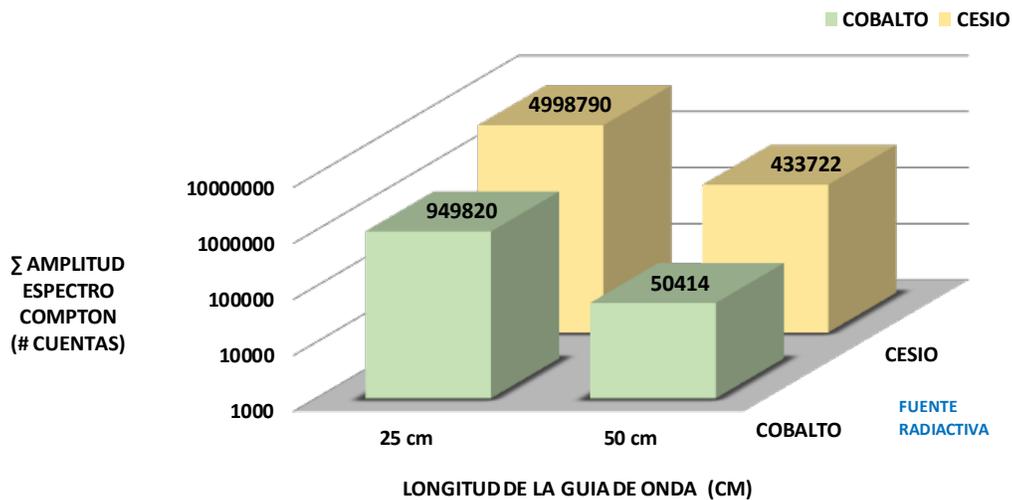


Figura 4.14.  $\Sigma$  de cuentas del espectro utilizando un plástico cilíndrico y una a guía de onda cuadra con diferentes longitudes.

## 5. CONCLUSIONES

A lo largo del desarrollo del trabajo de investigación se adquirieron conocimientos relacionados con la instrumentación de radiación gamma, con ello el comportamiento de la radiación con la materia y la espectrometría que se genera con dicha interacción; además se investigaron los diversos tipos de detectores y sus características principales.

Si bien existen diversos tipos de detectores se logró identificar y caracterizar los componentes del prototipo propuesto para la investigación; iniciando con el plástico centellador hasta utilizar diferentes configuraciones utilizando taper de acrílico, obteniendo las siguientes conclusiones.

- La caracterización por la cantidad de material centellador, indica que a mayor volumen de centellador se tendrá un mayor número de pulsos, lo que da como resultado un mayor número de pulsos eléctricos y con ello una alta eficiencia del detector.
- Para la eficiencia del plástico centellador se tiene que es más eficiente el cilindro que cualquier cono truncado; esto debido a que se tendrá mayor material centellador cuando tenemos un cilindro lo que representa una mayor cantidad de luz que se producirá en el centelleo; sin embargo al tener una mayor cantidad de material el costo aumenta.
- Si se tiene un presupuesto bajo se puede utilizar el plástico centellador como guía de onda ya que en el existirá el menor número de acoplamientos y al funcionar el plástico como guía estaremos realizando una mejor acoplamiento óptico.
- Al utilizar una barra cuadrada de acrílico funciona mejor que la barra cilíndrica, debido a la forma de fabricación de cada una.
- AL tener una mayor longitud de guía de onda plástica se tiene un espectro con un menor número de cuentas.
- El sistema se comportó de manera repetitiva para los dos muestra que se utilizaron.
- La respuesta del sistema fue correcta ya que la fuente de Cobalto tuvo un pico de energía mayor al de Cesio.
- En la figura 5.1 se puede observar el espectro de Cobalto resultante al utilizar las diferentes configuraciones utilizadas a lo largo de la investigación, se concluye que el pico de energía del espectro Compton se recorrió al lado izquierdo cada vez que se agregó algún componente, incluso para la experimentación utilizando la guía de 50 cm largo, el pico podría ser envuelto por el ruido de fondo.

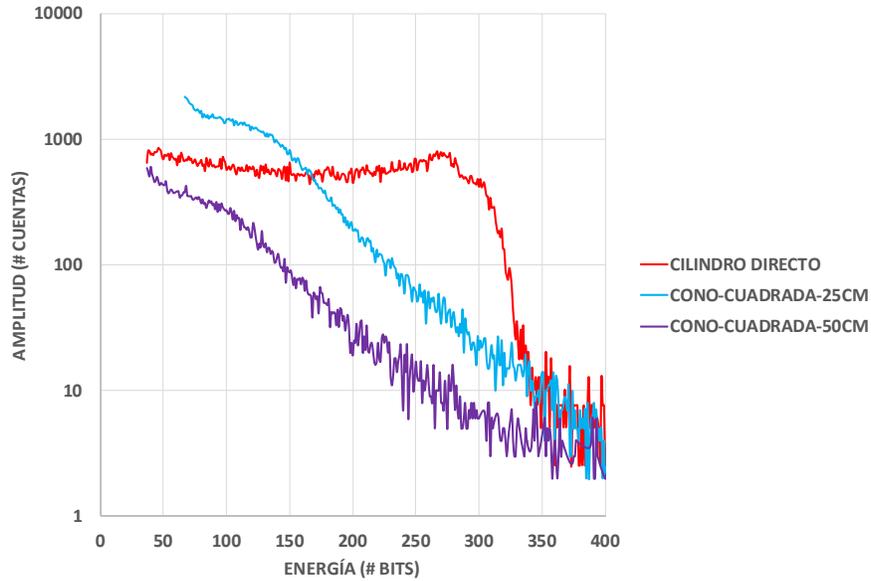


Figura 5.1. Grafica de comportamiento de los experimentos con la fuente de Cobalto

- En la figura 5.2 se puede observar el espectro de Cesio resultante al utilizar las diferentes configuraciones utilizadas a lo largo de la investigación, de nueva cuenta el pico de energía del espectro Compton se recorrió al lado izquierdo cada vez que se agregó algún componente, en los espectro donde se utilizó la guía de 25 y 50 cm largo, el pico podría ser envuelto por el ruido de fondo.

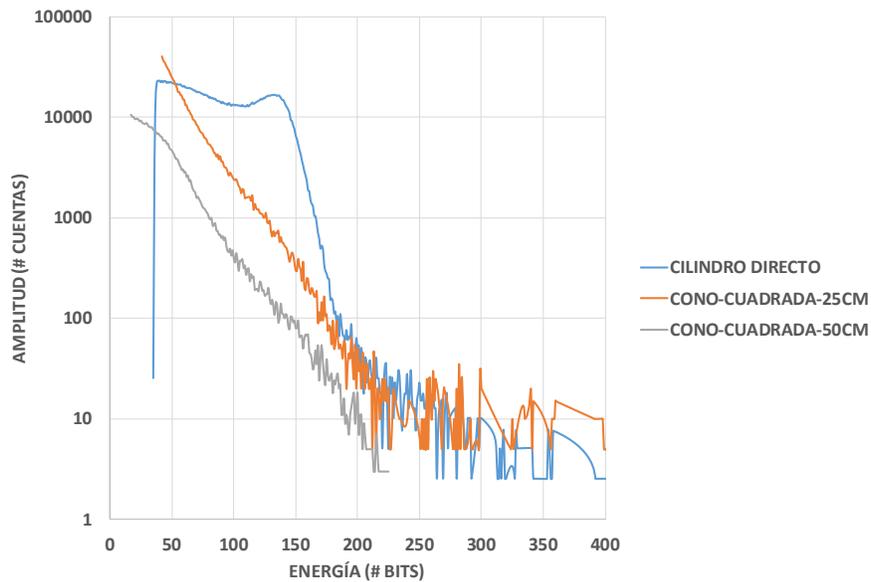


Figura 5.2. . Grafica de comportamiento de los experimentos con la fuente de CESIO

- El mejor sistema sería tener un plástico centellador con el mismo diámetro que la guía de onda, lo que se puede representar con una guía de onda centelladora (scintillator fiber optic); además de que esta fibra se podría dopar a cierta distancia para que se amplifique la señal óptica.
- Teniendo un presupuesto más elevado se podrían utilizar materiales con mejores características y con ello se obtendrían resultados con una mayor definición y sin tantas pérdidas, estos materiales pueden ser hacer un taper de vidrio óptico, una guía de onda de una dimensión considerable y que su propagación sea muy eficiente.

## V. BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, 3a Ed., U. S. A.: Jhon Wiley, 2010.
- [2] J. Turner, *Atoms, Radiation, and Radiation Protection*, 3a Ed., U. S. A.: Wiley-VCH, 2007.
- [3] W. R. Leo, *Techniques for nuclear and particle physics experiment*, New York: Springer Verlag, 1994.
- [4] C. E. CROUTHAMEL, F. ADAMS y R. ADAMS, *APPLIED GAMMA-RAY SPECTROMETRY*, Belgium: Pergamon Press, 1970.
- [5] K. K. Pourtangestani, *Optimization of Plastic Scintillator Thicknesses for Online Beta Detection in Mixed Fields*, Canada: Master of Science, University of Ontario Institute of Technology, 2010.
- [6] T. J. GOODING y H. G. PUGH, «THE RESPONSE OF PLASTIC SCINTILLATORS TO HIGH-ENERGY PARTICLES,» *NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS*, vol. 7, pp. 189--192, 1960.
- [7] F. D. BECCHETTI, C. E. THORN y M. J. LEVINE, «RESPONSE OF PLASTIC SCINTILLATOR DETECTORS TO HEAVY IONS,  $Z \leq 35$ ,  $E \leq 170$  MeV,» *NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS*, vol. 138, pp. 93-104, 1976.
- [8] A. VARELA, R. POLICRONIADES, J. LOPEZ y R. MAGGI, «Measurement of the absolute neutron efficiency for a NE-102A scintillator in the energy range 2-7 MeV using the associated particle technique,» *Revista Mexicana de Física*, vol. 38, nº 6, pp. 875-885, 1992.
- [9] G. O'Rielly, N. Kolb y R. Pywell, «The response of plastic scintillator to protons and deuterons,» *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, vol. A, nº 368, pp. 745-749, 1996.
- [10] C. W. E. Eijk, «Inorganic scintillators in medical imaging,» *PHYSICS IN MEDICINE AND BIOLOGY*, vol. 47, pp. R85-R106, 2002.
- [11] H. R. Vega-Carrillo, E. Manzanares-Acuña, V. M. Hernández-Dávila y A. Chacón-Ruíz, «Determinación de la Respuesta de un Detector de NaI(Tl),» de *Primer Congreso Americano del IRPA 2006*, Acapulco Mexico, 2006.
- [12] C. Salgado, L. Brandão, R. Schirru, C. Pereira y C. Conti, «Validation of a NaI(Tl) detector's model developed with MCNPX code,» *Progress in Nuclear Energy*, vol. 59, nº 3, pp. 19-25, 2012.

- [13] M. R. Kohan, G. Etaati, N. Ghal-Eh, M. Safari, H. Afarideh y E. Asadi, «Modelling plastic scintillator response to gamma rays using light transport incorporated FLUKA code,» *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 70, pp. 864-867, 2012.
- [14] E. Coello, F. Favela, Q. Curiel, E. Chávez, A. Huerta, A. Varela y D. Shapira, «Position sensitive detection system for charged particles,» *Revista Mexicana de Física*, vol. 58, p. 198–204, 2012.
- [15] S. Vergara, M. Vargas, G. Paicb, G. Tejeda, A. Fernandez, I. León, F. Reyes y L. Villaseñor, «Characterization of the ACORDE scintillator counters using a PCI electronic card,» *REVISTA MEXICANA DE FÍSICA*, vol. 53, nº 2, p. 120–125, 2007.
- [16] A. Huerta, R. Guerrero, Q. Curiel, J. Huelgas, P. Rodríguez, F. Favela, D. Marín, M. E. Ortiz, L. Barrón, E. Chávez, E. Moreno, G. Murillo, R. Policroniades y A. Varela, «Working out the position resolution on large scintillating detectors, through the “light attenuation method”,» *REVISTA MEXICANA DE FÍSICA*, vol. 54, nº 1, p. 9–12, 2008.
- [17] H. Tavakoli-Anbaran, R. Izadi-Njafabadi y H. Miri-Hakimabad, «The Effect of Detector Dimensions on the NaI(Tl) Detector Response Function,» *Journal of Applied Sciences*, vol. 9, nº 11, pp. 2168-2173, 2009.
- [18] A. Fernandez Fernandez, B. Brichard, S. O’Keeffe, C. Fitzpatrick, E. Lewis, J.-R. Vaille, L. Dusseau, D. Jackson, F. Ravotti, M. Glaser y H. El-Rabii, «Real-time fibre optic radiation dosimeters for nuclear environment monitoring around thermonuclear reactors,» *Fusion Engineering and Design*, vol. 83, pp. 50-59, 2008.
- [19] W. J. Yoo, S. H. Shin, D. E. Lee, K. W. Jang, S. Cho y B. Lee, «Development of a Small-Sized, Flexible, and Insertable Fiber-Optic Radiation Sensor for Gamma-Ray Spectroscopy,» *Sensors*, vol. 15, pp. 21265-21279, 2015.
- [20] B. Lee, S. H. Shin, K. W. Jang y W. J. Yoo, «Effects of Temperature and X-rays on Plastic Scintillating Fiber and Infrared Optical Fiber,» *Sensors*, vol. 15, pp. 11012-11026, 2015.
- [21] M. W. SEO, J. K. KIM y J. W. PARK, «Test of a Fiber Optic Scintillation Dosimeter with BGO Tip in a  $^{60}\text{Co}$  Irradiation Chamber,» *Progress in NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY*, vol. 1, pp. 196-189, 2011.
- [22] K. W. Jang, W. J. Yoo, S. H. Shin, D. Shin y B. Lee, «Fiber-optic Cerenkov radiation sensor for proton therapy dosimetry,» *OPTICS EXPRESS*, vol. 20, nº 13, p. 13907, 2012.

- [23] P. Chan Hee, L. Arim, K. Rinah y M. Joo Hyun, «Evaluation of the Detection Efficiency of LYSO Scintillator in the Fiber-Optic Radiation Sensor,» *Science and Technology of Nuclear Installations*, vol. 2014, nº ID 248403, p. 6, 2014.
- [24] S. O’Keeffe, A. F. Fernandez, C. Fitzpatrick, B. Brichard y E. Lewis, «Real-time gamma dosimetry using PMMA optical fibres for applications in the sterilization industry,» *Measurement Science and Technology*, vol. 18, nº 5, pp. 3171-3176, 2007.
- [25] N. Enterprises, «Scintillators for the physical sciences,» Thorn EMI.
- [26] B. E. A. Saleh, *Fundamentals of photonics*, New York: J. Wiley, 1991.
- [27] G. P. Agrawal, *Fiber-optic communication systems*, New York: J. Wiley, 1992.
- [28] Hamamatsu, *Photomultiplier Tubes Basics and Applications*, Hamamatsu, 2007.
- [29] S. Flyckt y C. Marmonier, *PHOTOMULTIPLIER TUBES principles & applications*, Brive, France: Photonis, 2002.
- [30] Ortec, *Preamplifier Introduction*, U.S.A.: Ortec.
- [31] Ortec, *The Multichannel Pulse-Height Analyzer*, U.S.A.: Ortec.
- [32] Saint-Gobain Crystals, «Efficiency Calculations for Selected Scintillators,» Saint-Gobain Ceramics & Plastics, Inc, 2004.
- [33] Optiwave Systems Inc, «<http://optiwave.com/>,» Optiwave Systems Inc, 2016. [En línea]. Available: <http://optiwave.com/products/component-design/optifdtd/optical-fdtd/>.
- [34] Ortec, *Scintillation Preamplifier 113*, Tennessee: Ametek.
- [35] Ortec, *572A Amplifier*, Tennessee: Ametek.