



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas

Síntesis, caracterización y simulación de
elementos centelladores para su aplicación
como monitor de radiación

Tesis Presentada al

Colegio de Física

como requisito para la obtención del grado de

Licenciada en Física Aplicada

por

Laura Gabriela Vargas Hernández

asesorada por

Dr. Eduardo Moreno Barbosa
Dr. Benito de Celis Alonso

Puebla, Pue.
(Agosto) 2016

Síntesis, caracterización y simulación de elementos centelladores para su aplicación como monitor de radiación

Tesis

Laura Gabriela Vargas Hernández

asesorada por:

Dr. Eduardo Moreno Barbosa

Dr. Benito de Celis Alonso



Dedicada a:

*Mis padres Laura y Daniel,
y a mi inseparable Chio Vargas.*

Agradecimientos

*Al Lic. Roberto Alvarez Zavala
Al Dr. Martín Rodolfo Palomino Merino
Por permitirnos hacer uso de las instalaciones del
laboratorio de materiales, por todas sus enseñanzas
y apoyo.*

*A los doctores:
Eduardo Moreno Barbosa
Benito de Celis Alonso,
José Ramos Méndez
Por todo su apoyo confianza, paciencia y enseñanza
para la realización de este trabajo. Por impulsarme a
salir adelante y darme a conocer esta hermosa área
de la física.*

Título: Síntesis, caracterización y simulación de elementos centelladores para su aplicación como monitores de radiación.

Estudiante: Laura Gabriela Vargas Hernández

COMITÉ

Dr. Rodolfo Martín Palomino Merino
Presidente

Dr. Mario Iván Martínez Hernández
Secretario

Dra. Iraís Bautista Guzmán
Vocal

Dr. Benito De Celis Alonso
Co asesor

Dr. Eduardo Moreno Barbosa
Asesor

Índice general

1. Interacción de la radiación con la materia	1
1.1. Radiación ionizante	1
1.2. Detectores y dosímetros	4
1.3. Propiedades y características generales de los detectores	5
1.4. Tipos de detectores	8
1.4.1. Monitores de Radiación	8
1.4.2. Detectores basados en ionización gaseosa	10
1.4.3. Detectores de centelleo	11
1.4.4. Detectores semiconductores	14
1.4.5. Detectores Radiofotoluminiscentes	15
1.4.6. Detectores Termoluminiscentes	15
2. Síntesis de Plástico Centellador	17
2.1. Proceso de síntesis de plástico centellador	17
2.1.1. Proceso de polimerización	17
2.1.2. Dopantes	19
2.1.3. Catalizador	21
3. Caracterización de muestras de plástico centellador	23
3.1. Definición y Clasificación de los métodos ópticos de análisis	23
3.2. Tipos de espectros y mecanismos de interacción	23
3.2.1. Espectros de Absorción	23
3.2.2. Espectros de Emisión	25
3.2.3. Espectros de transmitancia	26

3.2.4. Reflectancia	27
3.2.5. Fluorescencia	27
4. Simulación de muestras de plástico centellador	31
4.1. Definición de material	31
4.2. Definición de la geometría	32
4.3. Fuente de partículas	32
5. Metodología de experimento	35
5.1. Metodo de síntesis de muestras de plástico centellador	35
5.2. Métodos de Caracterización de muestras de plástico centellador	37
5.3. Métodos de la Simulación de las muestras de plástico centellador.	37
6. Resultados de la caracterización y simulación de los plásticos centelladores.	39

Índice de figuras

1.1. Interacción de radiación con átomo con suficiente energía para retirar un electrón orbital [3]	2
1.2. Interacción de radiación ionizante directa e indirecta en la célula [4]	2
1.3. Espectro de radiaciones electromagnéticas ionizante/ no ionizante [3].	3
1.4. Tipos de radiación con sus respectivas frecuencias y energías.[3]	3
1.5. Porcentaje total de exposición de radiación [3].	4
1.6. Distribución de amplitudes medidas para dos radiaciones monoenergéticas.	7
1.7. Espectro obtenido de una radiación monoenergética a) sensor de germanio, b) sensor de centelleo.	7
1.8. Esquema básico de un detector gaseoso [20].	10
1.9. Regiones de operación de un detector por ionización en gases [17].	11
1.10. Representación esquemática de la secuencia de eventos que ocurren en el acoplamiento de un centellador con un tubo fotomultiplicador. [18]	12
1.11. Modelo de emisión de fluorescencia y fosforescencia.[21]	13
1.12. Plástico centellador emitiendo luz al ser irradiada con una fuente de luz ultravioleta. Fotografía tomada en el Laboratorio de Materiales, FCFM-BUAP	14
1.13. Representación esquemática de un detector semiconductor. [13]	15
2.1. Monómeros que siguen el mecanismo de polimerización por adición de radicales libres [16].	18
2.2. Espectro de radiaciones electromagnéticas ionizante/ no ionizante.	18
2.3. Estructura de moécula de PPO [7]	19
2.4. Estructura de moécula de POPOP [7]	20
2.5. Espectros de emisión de PPO y POPOP disuelto en Etanol [8].	20
2.6. Estructura de molécula de catalizador (Peróxido de Benzoyl)[7].	21

3.1. Transiciones de los niveles de energía que intervienen en los espectros de absorción, emisión y Raman [9].	26
3.2. La excitación de un fluoruro a tres diferentes longitudes de onda (EX 1, EX 2, EX 3) no cambia el perfil de emisión, pero produce variaciones en la intensidad de emisión de fluorescencia (EM 1, EM 2, EM 3) que corresponden a la amplitud del espectro de excitación [8].	28
3.3. Material centellador acoplado a PMT mediante fibra de corrimiento de longitud de onda [19].	28
4.1. Ejemplo de entidades geométricas en TOPAS.[22]	32
5.1. Vaso de precipitado con reactivos para síntesis de muestras de plástico centellador.	36
5.2. Fuente de luz de Halógeno Ocean Optics. (www.oceanoptics.com)	37
5.3. Muestra de plástico centellador al ser irradiada por la fuente.	37
5.4. Simulación de la geometría de una de las muestras de plástico centellador en TOPAS.	38
6.1. Espectros de fluorescencia de las muestras de plástico.	39
6.2. Espectros de fluorescencia de plástico comercial (Eljen Technology).	40
6.3. En color azul rojo y cian se presentan los espectros de emisión normalizados de las muestras de plástico centellador con fibra de corrimiento de onda acoplada, en color negro el espectro de emisión de la fuente que llamamos Base.	40
6.4. La gráfica presenta el porcentaje de transmitancia de las tres muestras de plástico centellador con la fibra de corrimiento de longitud de onda acoplada.	41
6.5. Ejemplo de muestra irradiada con partículas gamma.	42

Resumen

En este trabajo se evalúa el comportamiento de unas muestras de plástico centellador elaboradas en el laboratorio de materiales de la FCFM, para su posible aplicación como monitor de radiación en el rango de energías de un acelerador lineal de radioterapia.

El primer capítulo contiene la descripción de los conceptos de radiación ionizante, detectores y dosímetros, así como cantidades y unidades de medición de radiaciones. Se describen los tipos de detectores más utilizados así como su funcionamiento y características principales.

En el segundo capítulo se describe el proceso de síntesis de muestras de plástico centellador cada una con sus respectivas características. Se describen los componentes y reactivos de las muestras elaboradas.

En el tercer capítulo se describen los métodos ópticos de análisis que se utilizaron para la caracterización de las muestras de plástico centellador elaboradas.

En el cuarto capítulo se presenta una descripción del proceso de simulación de las muestras de plástico centellador.

En el quinto capítulo se presenta la metodología del experimento que consta de la síntesis de las muestras del plástico centellador, la caracterización y la simulación de las mismas.

En el sexto capítulo se describen los resultados obtenidos en este trabajo de tesis.

INTRODUCCIÓN

El hombre se encuentra sometido todo el tiempo a la acción de radiación, ya sea de fuentes naturales como el sol o fuentes artificiales como un aparato de Rayos X. Sin embargo, ninguno de nuestros sentidos está capacitado para percibirla, a pesar de que pueden causarle algún tipo de daño. Una sobre exposición a la radiación, incluso mortal, no es percibida por la víctima y sus primeros efectos sólo se manifiestan luego de algunas horas, días o varios años después de la exposición.

La mayor parte de la radiación recibida por la población mundial es por fuentes naturales, como los rayos cósmicos producidos en su mayoría por la actividad estelar. Sin embargo, en las últimas décadas el hombre ha producido varios cientos de radionúclidos en forma artificial, con diversos propósitos, desde aplicaciones médicas hasta aplicaciones bélicas.

Cuando las partículas que son irradiadas interactúan con los dispositivos de detección, depositan toda su energía en los materiales que los constituyen. Los mecanismos que entonces se desencadenan, son la base de la formación de la señal a medir, que se encuentra directamente relacionada con la dosis de radiación recibida. Sin embargo, no todos estos mecanismos pueden ser efectivamente utilizados para la detección de partículas. La emisión por fluorescencia y el efecto fotoeléctrico se encuentran entre los procesos más utilizados en física de altas energías e interacción de la radiación con la materia. En particular, uno de los monitores y detectores más utilizados basados en éste tipo de fenómeno físico son los llamados centelladores.

En particular los plásticos centelladores resultaron ser uno de los descubrimientos mas interesantes en el área de monitoreo y detección de partículas de fotones de altas energías. El primer uso de centelladores de fue en el año de 1903 en el que William Crooks observó el fenómeno en una pantalla de sulfuro de zinc golpeada por partículas alfa. El centelleo producido en la pantalla era evidente a simple vista. Posteriormente se volvió a utilizar en 1944 cuando Curran y Baker sustituyeron el ojo por el recién inventado fotomultiplicador, y fue a partir de entonces cuando se comenzó su implementación en el área de detección. [1]

Es en el área de imagen médica entre otras, en donde los materiales centelladores tienen una aplicación muy práctica. En efecto, un médico puede sospechar que su paciente, dados sus síntomas tiene un tumor, pero en lugar de realizar una peligrosa cirugía exploratoria le prescribe una tomografía por emisión de positrones. Esta técnica consiste en administrar al paciente un isótopo de carbono, nitrógeno u oxígeno, que son los principales componentes de las moléculas de la materia viva. Estos además son capaces de emitir ciertos electrones con carga positiva conocidos como positrones. Cuando un positron es emitido por el fármaco administrado al paciente y encuentra un electrón del tejido se produce una reacción de aniquilación. El positrón y el electrón desaparecen, creandose en su lugar dos rayos

gamma que viajan en direcciones opuestas. El registro de estas aniquilaciones mediante la detección de rayos gamma permite procesar una imagen que el médico utilizará para su diagnóstico. En caso de existir un tumor, éste podrá ser localizado e iniciar la terapia. La detección de los rayos gamma mencionados, y por consiguiente la aniquilación a la que están asociados, se hace aprovechando las propiedades de un material centellador. Los primeros tomógrafos por emisión de positrones se construyeron a principios de la década de los 70. En ellos se utilizó como centellador un compuesto de sodio con impurezas de talio, material relativamente ineficiente. Actualmente la invención de centelladores con mejores características es un campo abierto a la investigación.[23]

Los materiales centelladores presentan varias ventajas en el área médica. Tienen el potencial de obtener las medidas exactas de la dosis de radiación recibida en un tejido. Tienen la característica de ser tejido equivalente lo que significa que tienen propiedades de absorción y dispersión que coinciden suficientemente con las de un tejido biológico[24]. Además pueden producir medidas rápidas y en tiempo real.

En este trabajo de tesis se presentan tres plásticos centelladores elaborados en el laboratorio de materiales de la FCFM. Pensamos que eventualmente pueden utilizarse como monitores de radiación gracias a sus propiedades. Es por esto que aquí realizamos una descripción de estos.

Capítulo 1

Interacción de la radiación con la materia

La radiación es un fenómeno por el que se propaga la energía a través del espacio o un medio en forma de ondas electromagnéticas o partículas.

La radiación que es propagada en forma de ondas electromagnéticas como los rayos ultravioleta, rayos gamma, rayos X, ondas de radio etc., es llamada radiación electromagnética. Tienen la característica de no tener masa, tiene longitud de onda (λ), frecuencia (ν) y energía por fotón (E).

La radiación de partículas es la radiación corpuscular de partículas subatómicas como las partículas alfa (α), beta (β), neutrones, etc.

1.1. Radiación ionizante

En la mayoría de los casos donde existe interacción entre la radiación y la materia hay como consecuencia la transferencia de energía de la radiación a la materia. La radiación puede interactuar directamente con el núcleo del átomo, con los electrones orbitales o con ambos.

Este tipo de radiación es llamada ionizante, y es producida generalmente cuando la partícula que es irradiada es capaz de retirar un electrón orbital del átomo con el que interactúa. En otras palabras, la ionización es el proceso mediante el cual un átomo neutro adquiere una carga positiva o negativa. Ver FIGURA 1.1

La interacción de la radiación con el cuerpo sucede cuando las células absorben radiaciones ionizantes donde se forman moléculas estables e inestables. Esta interacción puede producirse en macromoléculas (por ejemplo, el ácido desoxirribonucleico (ADN)), o bien, en el medio en que están suspendidos los órganos celulares (citoplasma). La acción de la radiación sobre la célula se puede clasificar en directo o indirecto, según el lugar donde se produzcan esas interacciones.

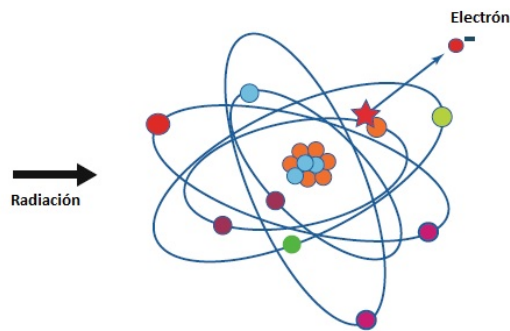


FIGURA 1.1: Interacción de radiación con átomo con suficiente energía para retirar un electrón orbital [3]

Si la radiación transporta energía suficiente como para provocar ionización en el medio que atraviesa se dice que es una radiación ionizante. En caso contrario se habla de radiación no ionizante. El carácter ionizante o no ionizante de la radiación es independiente de su naturaleza corpuscular u ondulatoria. [2]

Acción directa

La acción directa ocurre cuando la radiación ionizante interacciona y es absorbida por una macromolécula biológica como el ADN, el ARN (ácido ribonucleico), las proteínas estructurales o cualquier otra macro molécula de la célula, que se traduce en cambios de su estructura o función. Como consecuencia de esto se produce daño y destrucción de la macromolécula que puede producir eventualmente si no es reparado muerte celular.[4]

Acción indirecta

La acción indirecta implica la absorción de radiación ionizante por el medio en el cual están suspendidas las moléculas. Esta interacción ocurre fundamentalmente en el agua, dando lugar a la formación de iones y radicales libres. [4] La FIGURA 1.2 indica gráficamente los mecanismos de acción directa y acción indirecta.

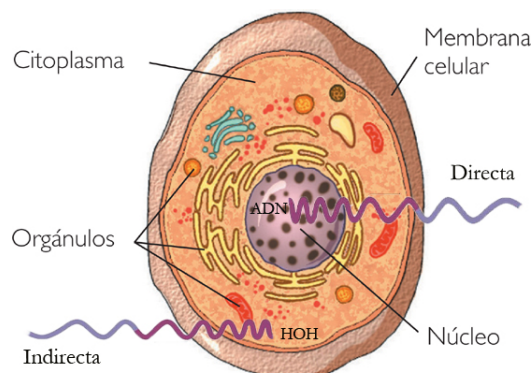


FIGURA 1.2: Interacción de radiación ionizante directa e indirecta en la célula [4]

CAPÍTULO 1 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA MATERIA

1.1. RADIACIÓN IONIZANTE

En particular cuando se trata de un tratamiento de cáncer en donde el medio de absorción de energía consiste en tejido corporal, debe ser depositada suficiente energía en las células cancerígenas para destruir su capacidad regenerativa y reproductiva.

A excepción de casos en que la radiación es usada como tratamiento o diagnóstico de algún tipo de padecimiento, la actividad de la radiación ionizante es muy perjudicial para la salud. Es por eso que resulta de gran importancia el estudio de cualquier tipo de radiación que pueda tener algún impacto biológico en el ser humano. De hecho, la detección de la radiación ionizante en la medicina ha sido la meta principal de estudio de la comunidad de investigación desde el descubrimiento de la radiactividad producida artificialmente en 1934 y la producción de radionúclidos en 1946.

Los rayos X, los rayos gamma y la luz ultravioleta son las únicas formas de radiación electromagnética con suficiente energía para ionizar una célula (FIGURA 1.3), así como algunas partículas de movimiento rápido (partículas con elevada energía cinética).

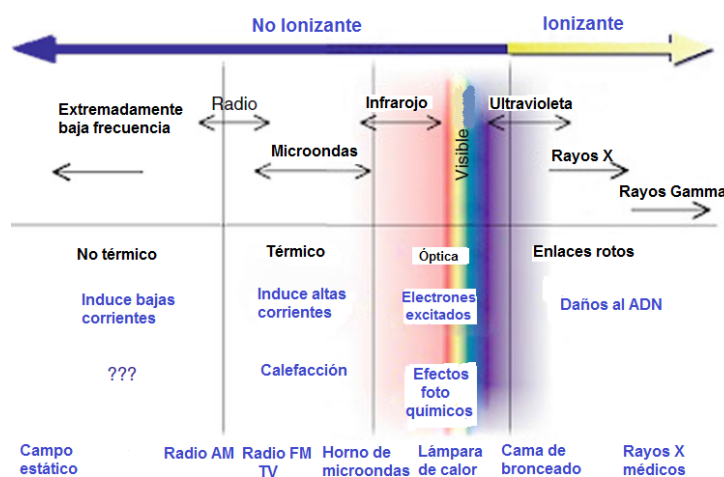


FIGURA 1.3: Espectro de radiaciones electromagnéticas ionizante/ no ionizante [3].

En la FIGURA 1.4 se listan algunos tipos de radiaciones con sus respectivas frecuencias y energías.

Radiación	Frecuencia típica (s^{-1})	Energía típica (kJ/mol)
Partículas alpha (α)		4.1×10^8
Radiación electromagnética		
Rayos cósmicos	$6 \times 10^{21} s^{-1}$	2.4×10^9 radiación ionizante
Rayos gamma (γ)	$3 \times 10^{20} s^{-1}$	1.2×10^8 radiación ionizante
Rayos X	$3 \times 10^{17} s^{-1}$	1.2×10^5
Ultravioleta (UV)	$3 \times 10^{15} s^{-1}$	1,200 radiación no ionizante
Visible	$3 \times 10^{14} s^{-1}$	200 radiación no ionizante
Infrarrojo (IR)	$3 \times 10^{13} s^{-1}$	12 radiación no ionizante
Microondas	$3 \times 10^9 s^{-1}$	1.2×10^{-3} radiación no ionizante
Ondas de radio	$3 \times 10^7 s^{-1}$	1.2×10^{-5} radiación no ionizante

FIGURA 1.4: Tipos de radiación con sus respectivas frecuencias y energías.[3]

1.2. Detectores y dosímetros

En la actualidad, las fuentes de radiación utilizadas en las aplicaciones médicas son las que mas contribuyen a la dosis que perciben los seres humanos por parte de fuentes no naturales de radiación. Estas contribuyen con cerca de 310 mrem de nuestra exposición anual a la radiación (*rem* es la unidad de medida de la dosis de radiación, 1 rem= 0.01 Sv, *mrem* equivale a una milésima de *rem*). Esto es la radiación que es utilizada para tratamientos o diagnóstico, los equipos de rayos X, las técnicas de diagnóstico en que se utilizan radioisótopos y las técnicas para el tratamiento de cáncer que han resultado ser una de las mejores y más útiles herramientas para los médicos. La FIGURA 1.5 muestra una lista del porcentaje en que fuentes de radiación que afectan el ambiente y nuestro alrededor.

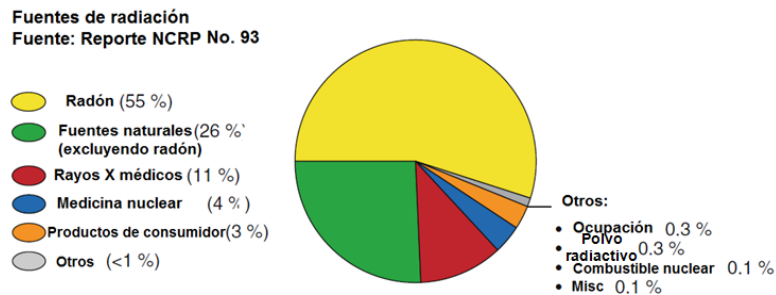


FIGURA 1.5: Porcentaje total de exposición de radiación [3].

Antes de describir los tipos de detectores y su funcionamiento, es importante conocer algunas de las unidades mas importantes usadas para de la medición de radiaciones ionizantes.

Dosis absorbida

Con el paso de los años resultó necesario definir una cantidad para cuantificar la radiación absorbida por la materia. La cantidad *dosis absorbida* se define para describir la cantidad de radiación ionizante.

Roentgen

Es definida como la energía disipada por la radiación ionizante en el aire. El valor de exposición se expresa en coulomb por kilogramo (C/Kg), y la unidad roentgen (R) es relacionada con la exposición como:

$$1R = 2,58 * 10^{-4} C/Kg \quad (1.1)$$

Por lo tanto, podemos decir que la exposición es el efecto de un flujo determinado de radiación en un volumen de aire de prueba.

CAPÍTULO 1 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA MATERIA

1.3. PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS DETECTORES

Energía de ionización

La energía de ionización es medida en electronvolts (eV). Se define como la energía cinética adquirida por un electrón al ser arrancado del átomo por radiación ionizante. La unidad de la energía en el sistema internacional es expresada en joules (J). Un joule es equivalente a $6,241 * 10^{18}$ eV. La energía de radiación (E) puede relacionarse con la longitud de onda (λ) del fotón como:

$$E = (1,240 * 10^{-6} / \lambda) \quad (1.2)$$

donde la unidad de λ es metros (m).

La definición matemática mas común de dosis absorbida, o simplemente dosis, es el cociente $\frac{d\bar{E}}{dm}$, donde $d\bar{E}$ es el promedio de energía de ionización producido por la radiación a un material de masa dm .

En el sistema internacional de unidades la unidad de la dosis es el *gray* (Gy), y es definido como:

$$1Gy = 1J/Kg \quad (1.3)$$

Con base a lo importante que resulta la cuantificación de la radiación absorbida por la materia, se desarrollaron instrumentos especializados para éste fin conocidos como detectores de radiación.

1.3. Propiedades y características generales de los detectores

Debido a que la radiación ionizante no puede ser percibida por los sentidos del ser humano, se requiere determinar su presencia mediante el empleo de los instrumentos adecuados para su detección. Todo trabajo con fuentes de radiación o sustancias radiactivas pueden dar lugar a exposiciones o contaminación interna del personal que se encuentra expuesto a ellas. Es por ello que es importante entender los procedimientos de seguridad, así como el funcionamiento y las propiedades de los detectores de radiación que se explican a continuación:

Sensibilidad. Indica la capacidad para detectar un tipo de radiación y energía. Debido a las características particulares de interacción con la materia de las diferentes radiaciones, un mismo sensor no es capaz de detectar cualquier radiación. La sensibilidad de un detector depende de varios factores:

- La sección atravesada por la radiación. Al aumentar la sección sensible aumenta la probabilidad de que la radiación produzca ionizaciones .

CAPÍTULO 1 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA MATERIA

1.3. PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS DETECTORES

- La masa del detector. Cuanto mayor es la densidad del material detector es mayor la radiación absorbida.
- Ruido intrínseco.
- El material que protege el volumen sensible del exterior. La ventana por la que penetra la radiación puede absorber una gran parte de la energía evitando que llegue al material sensor. Este material impone un límite mínimo a la energía de la radiación que podemos detectar.

Señal de Salida. Sabemos que la radiación va perdiendo energía conforme produce ionizaciones o excitaciones en el material. Si esta radiación atraviesa el detector sin haber podido perder toda su energía la respuesta suministrada no es igual a la energía total de la radiación.

La salida normalmente proporcionada por los sensores de radiaciones ionizantes es en forma de un pulso de corriente. La integral de este pulso proporciona la ionización total producida por la radiación. Si la forma del pulso es constante, basta con medir su amplitud máxima para poder determinar la energía de la radiación. La relación entre la altura del pulso suministrado y la energía de la partícula es lo que se conoce como *respuesta del sensor*.

Para muchos sensores la respuesta puede aproximarse como lineal dentro de un margen de energías y para un tipo de partículas. Para otros valores de energía o partículas diferentes aun de la misma energía esto no es cierto debido a los diferentes mecanismos de interacción con la materia que pueden producirse.

Resolución de energía. Factor Fano. La resolución nos indica la capacidad del detector para distinguir entre dos radiaciones de energía similar, es decir, la diferencia mínima de energía que puede ser detectada. Si sometieramos a un sensor a una radiación monoenergética idealmente siempre debe proporcionar la misma respuesta, de manera que una representación de la amplitud de los pulsos medidos tendría la forma lo más parecida a una delta. En la práctica esta amplitud variaría según una función de probabilidad normalmente gaussiana, como la que se representa en la FIGURA 1.6 para dos radiaciones diferentes. Se define a la resolución de un detector como la anchura de la función representada tomada entre los puntos de respuesta de la mitad de la máxima, se suele denominar FWHM (full width at half maximum). A veces se expresa de forma relativa como $\Delta E/E$.

El factor de Fano es función del tipo material detector y el método de detección. Los detectores por centelleo tienen un factor de Fano de valor cercano a la unidad. Mientras que para los de ionización con gas y semiconductores su valor es inferior (entre 0 y 1).

Función de respuesta. Como se mencionó la respuesta de un sensor a una radiación monoenergética puede aproximarse en muchos casos a una distribución gaussiana. Para tales sensores la interpretación de la señal ofrecida es relativamente simple. En otras situaciones no es así, pues los mecanismos que pueden desencadenarse durante el proceso de absorción de energía pueden ser diversos. En la FIGURA 1.7 se representa el espectro de energía captado por dos sensores diferentes sometidos a una misma radiación γ monoenergética. El sensor de germanio produce un espectro bien definido ya que prevalece como

CAPÍTULO 1 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA MATERIA
1.3. PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS DETECTORES

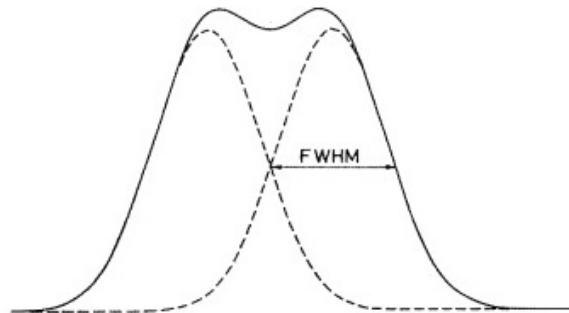


FIGURA 1.6: Distribución de amplitudes medidas para dos radiaciones monoenergéticas.

mecanismo de absorción el efecto fotoeléctrico que genera electrones de energía prácticamente constante, mientras que en el sensor de centelleo predomina la dispersión Compton que origina electrones con valor energético según una distribución continua.

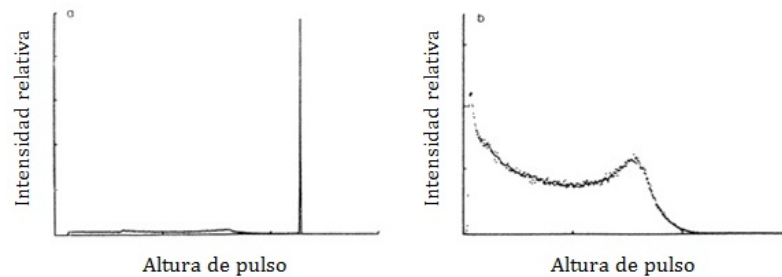


FIGURA 1.7: Espectro obtenido de una radiación monoenergética a) sensor de germanio, b) sensor de centelleo.

Tiempo de respuesta. Cuanto menores sean los tiempos de subida y respuesta de la señal proporcionada por el sensor, mejor es la localización temporal de la radiación detectada. Por otro lado, el tiempo de decaimiento debe ser también reducido para que permita detectar inmediatamente un nuevo evento de radiación. Si una segunda radiación llega al sensor antes de que este haya alcanzado el reposo su pulso puede quedar enmascarada por el anterior, o en algunos casos, el sensor puede incluso no responder a este nuevo evento. Estos fenómenos contribuyen al tiempo muerto del sensor y limitan la velocidad máxima de conteo de radiación.

Eficiencia de detección. Se definen varios tipos de eficiencia:

- **Eficiencia total.** Es el cociente entre el número de eventos registrados por el sensor y los generados por la fuente de radiación. Se puede descomponer como el producto de la eficiencia intrínseca y la geométrica.
- **Eficiencia intrínseca.** Representa el cociente entre los eventos registrados por el sensor y los que realmente llegan. Depende del tipo de radiación y de la capacidad del sensor para absorberla.
- **Eficiencia geométrica.** Es el cociente entre los eventos que son dirigidos al sensor y los generados por la fuente de radiación. Depende únicamente de la geometría del

detector y la fuente de radiación.

Tiempo muerto. Es el tiempo requerido por el sensor para procesar un suceso y esta normalmente relacionado con la duración del pulso de señal proporcionado. Dependiendo del tipo de detector, este puede quedar insensible a un nuevo suceso durante el tiempo muerto, o detectarlo produciendo una superposición de los pulsos. En ambos casos se puede ver afectada la cuenta de sucesos realizada por el sistema y la distribución temporal de los sucesos detectados.

Cuando se calcula el efecto del tiempo muerto todos los elementos del sistema de medida deben ser considerados, siendo en muchos casos el factor más importante el tiempo de procesamiento electrónico.

1.4. Tipos de detectores

De acuerdo con los fenómenos que se presentan en la materia debido a su interacción con radiación, se pueden clasificar los detectores empleados en radioprotección, según el mecanismo físico usado para el proceso como: detectores por ionización y detectores por excitación.

Los detectores por ionización comprenden básicamente aquellos en los que intervienen procesos de ionización de gases. Pueden ser cámaras de ionización, contadores proporcionales o detectores Geiger Müller.

Los detectores por excitación son aquellos en los que se es necesario una fuente de excitación externa para posteriormente lograr el proceso de detección, y pueden ser clasificados a su vez en inmediatos y retardados.

Los detectores de excitación inmediatos son básicamente los detectores de centelleo y los detectores de excitación retardados, agrupan entre otros a los de película fotográfica, los termoluminiscentes, los radiofotoluminiscentes, los de emisión exoelectrónica termo o fotoestimulada, los de resonancia paramagnética electrónica, etc.

Este tipo de instrumentación se puede clasificar, desde el punto de vista de la protección radiológica, en dos grandes grupos: monitores y dosímetros.

1.4.1. Monitores de Radiación

Estos sistemas de detección se pueden considerar por dos bloques básicos: el detector y el equipo electrónico asociado. El detector actúa como transductor, es decir, un dispositivo que transforma la energía de la radiación a medir en otro tipo de energía más fácil de procesar (por lo general una señal eléctrica).

La electrónica asociada tiene por objeto procesar adecuadamente la información entregada por el detector y presentarla en una forma adecuada, mediante una lectura en las

CAPÍTULO 1 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA MATERIA

1.4. TIPOS DE DETECTORES

unidades correspondientes para su interpretación y evaluación. Los monitores utilizados en radioprotección, poseen generalmente detectores de ionización de gases (Cámaras de ionización, contadores proporcionales, o G-M) cuya electrónica esta diseñada para dar una respuesta de tal forma que su lectura sea en unidades internacionales, así como monitores plásticos como los centelladores.

Los monitores se usan para determinar la rapidez de exposición en los instrumentos más antiguos, la rapidez de dosis absorbida ó la rapidez de dosis equivalente en los instrumentos mas recientes. La lectura de estos instrumentos puede estar dada en roentgen/hora (R/h), cuentas por minuto (cpm), miligray/hora (mGy/h), milisievert/hora (mSv/h), etc., según el tipo y modelos de instrumento utilizado. [11]

Existe una clasificación que tiene que ver directamente con la aplicación práctica en protección radiológica: dosímetros personales, monitores portátiles, detectores de área (radiación ambiental). Existe también una clasificación de detectores de radiación a distancia, por ejemplo electrómetros de precisión y detectores telescópicos.

Por el tipo de material sensible a la radiación los detectores pueden ser: sólidos, líquidos o gaseosos.

En general, los instrumentos de medición para la determinación de la dosis de radiación pueden ser clasificados en:

- Medidores de la relajación de exposición/tiempo, que dan la indicación directa de la exposición por unidad de tiempo y permitan medir un campo de radiación en un breve tiempo.
- Dosímetros que integran la exposición durante el periodo de medición y se emplean para conocer la exposición total.

Los instrumentos de relajación de exposición/tiempo se emplean como:

- Equipos portátiles, para determinar los niveles de exposición en laboratorios y centros de trabajo.
- Equipos estacionarios para monitoreo ambiental de áreas y monitoreo de uso general, especialmente para detectar cambios bruscos de exposición.

El propósito de este tipo de mediciones previas a un estudio es determinar en forma anticipada la dosis posible que puede percibir el personal previo a un estudio. Todo método de medición esta basado en la capacidad de la radiación para causar ionización.

La diferencia básica de los instrumentos es el medio en el cual se permite que ocurra la ionización.

Los principales métodos de detección basados en principios físicos y químicos se basan en:

- Gases
- Centelleo

- Dispositivos semiconductores
- Radiofotoluminiscencia y Absorción Óptica.
- Termoluminiscencia
- Calorimetría [12]

1.4.2. Detectores basados en ionización gaseosa

Los instrumentos de detección de radiación basados en el principio de recolección de iones formados por la acción de radiación ionizante sobre un gas, abarcan la mayoría de los instrumentos de detección usados hoy en día.

Un detector de éste tipo consiste en alguna cavidad llena de algún gas y provista de electrodos entre los que se aplica una diferencia de potencial. Esta cavidad puede consistir de dos placas paralelas, dos superficies cilíndricas concéntricas o una barra metálica rodeada de una superficie cilíndrica. Al interactuar la radiación con las moléculas del gas contenido entre los electrones produce iones, los cuales debido al voltaje aplicado entre los electrodos son atraídos hacia el ánodo los negativos y hacia el cátodo los positivos. Este flujo de iones constituye una corriente eléctrica que da la respuesta cuantitativa de la cantidad de radiación que recibe el detector. En la FIGURA 1.8 se ilustra este proceso.

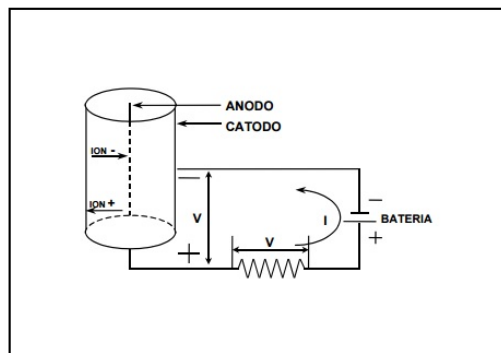


FIGURA 1.8: Esquema básico de un detector gaseoso [20].

Dependiendo de la región de respuesta del detector en función de la diferencia de potencial que se aplica a los electrodos, los detectores por ionización de gases se clasifican en: cámaras de ionización (C.I.), detectores proporcionales y detectores Geiger-Müller. Tal como se observa en la FIGURA 1.9.

Los detectores de (C.I) por lo general están llenos de gas, este tipo de detectores requieren que se les aplique un voltaje relativamente bajo (región II) ya que sólo colectan las cargas eléctricas producidas por la interacción de la radiación con el gas de llenado. Por esta razón, con estos instrumentos se puede medir la rapidez de exposición con mucha exactitud. Es común que las C.I. estén calibradas para expresar la rapidez de exposición en R/h o mR/h.

No obstante su alta sensibilidad, las C.I. no son lo suficientemente sensibles como para medir la rapidez de exposición con valores cercanos a la radiación de fondo. La sensibilidad adecuada sólo se consigue mediante la amplificación gaseosa, la cual se logra aumentando el voltaje para que opere en la región III sin perder proporcionalidad entre la respuesta y la

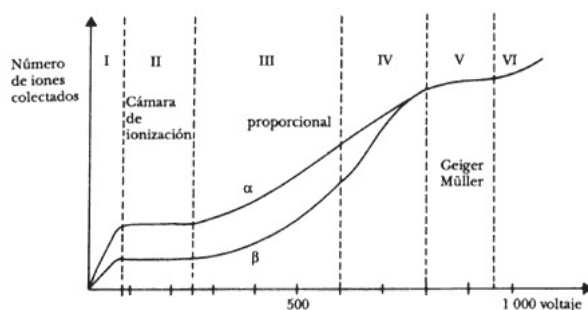


FIGURA 1.9: Regiones de operación de un detector por ionización en gases [17].

exposición. Por esta razón, a este tipo de detectores se les llama contadores proporcionales. El término “contador” significa que la salida es una serie de pulsos eléctricos que se pueden contar, y no una corriente promedio como en el caso de las C.I.

El voltaje aplicado a los electrodos es un poco mayor que el utilizado en las C.I., debido a ello se producen ionizaciones secundarias, lo cual crea una avalancha de electrones que luego van a ser detectados en uno de los electrodos. Se llaman proporcionales porque si se aumenta el voltaje aplicado a los electrodos aumenta proporcionalmente la fracción de electrones colectados. Estos detectores hacen diferenciación de energías y por lo tanto son adecuados para medir y distinguir entre diferentes tipos de radiación. Los pulsos colectados son relativamente pequeños y de todas formas se debe amplificar la señal.

Si el detector se opera a un voltaje todavía mayor (región V) y además el gas de llenado no es aire, entonces se tiene un detector Geiger Müller (G-M). El alto voltaje ocasiona que las cargas eléctricas se muevan con mayor rapidez produciendo más ionización al chocar con las moléculas del gas, esto hace que se produzca una serie de cargas eléctricas en cascada, dando lugar a una señal eléctrica muy grande correspondiente a unos cuantos iones producidos por la radiación en el gas del detector.

1.4.3. Detectores de centelleo

Un detector centellador es uno de los dispositivos de detección que se usa comúnmente como dispositivo de detección de partículas en la actualidad. Históricamente, uno de los primeros métodos empleados para detectar la radiación fue un contador de centelleo. Rutherford en sus experimentos clásicos sobre la dispersión de partículas alfa, empleó un cristal de sulfuro de zinc como detector primario de la radiación. Utilizó la vista para ver los destellos de luz que aparecían cuando las partículas golpeaban el sulfuro de zinc. Actualmente, la luz es vista electrónicamente mediante tubos fotomultiplicadores en los que los pulsos de salida son amplificados y contados. Diferentes tipos de radiación se pueden detectar con este tipo de instrumentos usando el centellador adecuado, en particular son utilizados para contar rayos gamma y betas de baja energía. [12]

Debido a que parte de la energía de excitación se pierde, la eficiencia de estos detectores es pobre, es por eso que es necesario que en la detección de la luz emitida sea empleado el tubo fotomultiplicador (PMT por sus siglas en inglés) acoplado al centellador que amplifica la luz convirtiéndola en una señal eléctrica para luego llevarla a una etapa de preamplificación y amplificación. Los centelladores no serían de gran utilidad si no se contara con un dispositivo que transforme su luz en señal eléctrica como los fotodetecto-

CAPÍTULO 1 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA MATERIA

1.4. TIPOS DE DETECTORES

res. Los fotomultiplicadores son los fotodetectores más utilizados en física de partículas, esto se debe a que tienen una ganancia interna muy alta, lo que permite obtener señales detectable incluso cuando son estimulados con pocos fotones. La señal eléctrica obtenida está en función del voltaje de operación del PMT y de su ganancia. [5]

Los fotones gamma al pasar a través del centellador, interactúan con los átomos de éste por los mecanismos de absorción fotoeléctrica, Compton y producción de pares. Las partículas ionizantes primarias resultantes de las interacciones gamma disipan su energía cinética excitando e ionizando los átomos del centellador. Los átomos ionizados regresan a su estado inicial con la emisión de cuantos de luz. Estos pulsos luminosos, al golpear el cátodo fotosensible del tubo fotomultiplicador, retiran electrones de este electrodo; éstos electrones son acelerados a un segundo electrodo llamado dínodo, cuyo potencial es aproximadamente 100 voltios con respecto al fotocátodo. Cada electrón que golpea el dínodo retira varios electrones de éste, multiplicando la fotocorriente original. Este proceso se repite alrededor de unas 10 veces antes de que todos los electrones producidos de esta manera, sean recolectados por la placa del tubo fotomultiplicador. Este pulso de corriente, cuya magnitud es proporcional a la energía de la partícula ionizante primaria, puede ser amplificada y contada [12]. En la FIGURA 1.10 se puede ver un esquema de un centellador acoplado a un tubo fotomultiplicador.

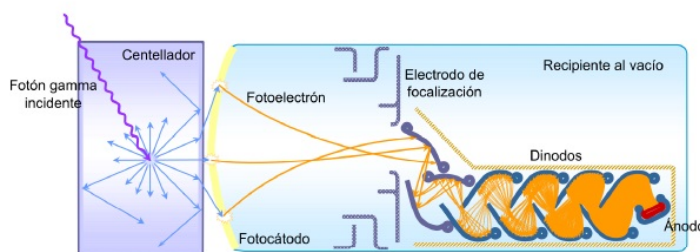


FIGURA 1.10: Representación esquemática de la secuencia de eventos que ocurren en el acoplamiento de un centellador con un tubo fotomultiplicador. [18]

Cuando el fenómeno de la emisión de luz del centellador sucede de manera instantánea ($< 10^{-9}$) se le denomina “fluorescencia”, y si sobrepasa un tiempo mayor a 10^{-9} s se le llama “fosforescencia”; parte de la energía de excitación es devuelta como vibración térmica y otra como radiación visible. Cuando ha sido excitado un electrón, este queda ocupando un nivel en la banda de conducción para luego caer en un estado metaestable de energía en la banda prohibida (entre la banda de conducción y la banda de valencia), inmediatamente cae al nivel de valencia emitiendo un fotón de luz (proceso fluorescente). El proceso es descrito en la FIGURA 1.11.

En particular, el proceso de fluorescencia en los materiales centelladores surge a partir de las transiciones de los niveles de energía de una molécula y por lo tanto se puede observar de una especie molecular independiente de su estado físico.

Con este tipo de detectores es posible medir además de partículas alfa de alta energía, partículas beta y radiación gamma de 5 keV en adelante.

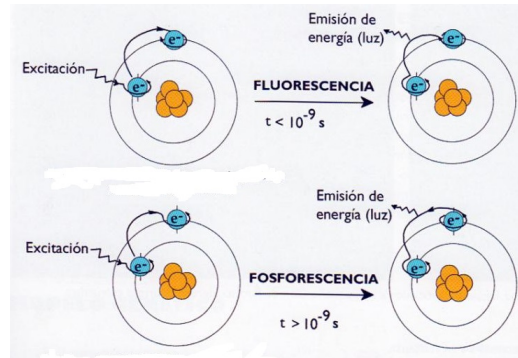


FIGURA 1.11: Modelo de emisión de fluorescencia y fosforescencia.[21]

En general, la señal de un centellador es capaz de proveer de una variedad de información. Entre las características más destacadas se encuentran:

- *Sensibilidad a la energía.* Por encima de cierta energía mínima, muchos de los centelladores se comportan linealmente respecto a la energía depositada. Por lo tanto la luz de salida del centellador es directamente proporcional a la energía de excitación. Como el fotomultiplicador también es un dispositivo lineal, la amplitud de la señal eléctrica final también es proporcional a la energía. Esto hace al centellador adecuado como un espectrómetro de energía.
- *Tiempo de respuesta rápido.* Los detectores de centelleo son instrumentos rápidos en el sentido de su tiempo de respuesta de emisión de luz, ya que su proceso de fluorescencia es instantáneo, está en el orden de los 10 ns posteriores a la interacción de la radiación con el material. Por otro lado el tiempo de recuperación es corto en comparación con otros tipos de detectores. La respuesta rápida permite obtener la información de tiempos, es decir, la diferencia temporal entre dos eventos con gran precisión. El tiempo de decaimiento está relacionado con el tiempo muerto en el que el detector y electrónica no pueden discriminar el arribo de una nueva partícula, limitando, así, la tasa de conteo máxima del sistema. Entonces, los centelladores resultan adecuados cuando se desean obtener rápidas respuestas o altas tasas de conteo.
- *Discriminación de la forma del pulso.* Con algunos centelladores, es posible distinguir entre diferentes tipos de partículas
- *Tejido Equivalente.* Debido a que el número atómico efectivo de la mayoría de este tipo de detectores es aproximadamente igual al tejido blando tiene gran aplicación en el área de dosimetría personal.

En la FIGURA 1.12 se puede observar un ejemplo de plástico centellador que fluoresce emitiendo luz en de longitud de onda de 450 nm (azul) cuando se es irradiado con una fuente de luz ultravioleta.

En general un material centellador ideal debe poseer las siguientes características:

- Debe convertir la energía cinética de las partículas cargadas en luz detectable con una alta eficiencia de centelleo ($\approx 1 \times 10^4$ fotones/MeV).



FIGURA 1.12: Plástico centellador emitiendo luz al ser irradiada con una fuente de luz ultravioleta. Fotografía tomada en el Laboratorio de Materiales, FCFM-BUAP

- La conversión debe ser lineal, la luz debe ser proporcional a la energía depositada sobre un amplio rango.
- El medio debe ser transparente a la longitud de onda de su propia emisión para una buena colección de luz.
- El tiempo de decaimiento de la radiación inducida debe ser corto para que las señales de los pulsos rápidos puedan ser generados.
- El material debe tener buena emisión de luz y debe poder producirse a diversos tamaños para que sea de interés como detector práctico.
- Su índice de refracción deber ser cercano al del vidrio ($\sim 1,5$) para permitir un acoplamiento eficiente de la luz centelladora al tubo fotomultiplicador o el sensor de luz.

1.4.4. Detectores semiconductores

Este tipo de detectores son sólidos construidos de elementos puros en los cuales la radiación ionizante produce un efecto de excitación de los electrones menos ligados al átomo. Estos electrones son llamados “electrones de valencia”, llevándolos a un nivel de mayor energía llamado nivel de “electrones de conducción”. Aquí pueden desplazarse libremente por el material. Al pasar a la banda de conducción quedan desligados de los átomos de la red dejando una vacante que corresponde a una carga positiva, esta vacante puede ser ocupada inmediatamente por un electrón del átomo vecino y éste a su vez deja una vacante que luego va a ser ocupada, dando como resultado una carga positiva desplazándose hacia el cátodo. A la ausencia de un electrón en banda de valencia se le conoce como hueco.

La operación de un detector semiconductor depende de si tiene exceso de electrones o de huecos. Un detector de este tipo con exceso de electrones se denomina semiconductor tipo N, mientras que uno con exceso de huecos se conoce como semiconductor tipo P. La figura 1.13 muestra la representación esquemática de un detector semiconductor.

Los detectores semiconductores son especialmente útiles para la medición de partículas cargadas, y sus ventajas son: alta velocidad de conteo, respuesta linealmente proporcional a la energía depositada en la capa vacía y bajo voltaje de operación.

Entre los materiales semiconductores más utilizados están el germanio, el silicio y el arseniuro de galio. [12]

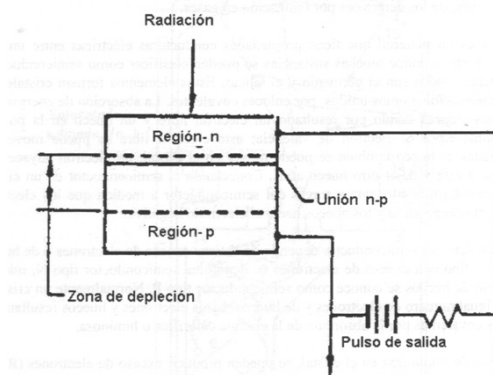


FIGURA 1.13: Representación esquemática de un detector semiconductor. [13]

Los detectores de radiación basados en semiconductores tienen una mejor resolución, sin embargo su costo es mas de diez el de la mayoría de los materiales centelleadores además una de sus desventajas es que requieren un mecanismo de enfriamiento para su funcionalidad.[13]

1.4.5. Detectores Radiofotoluminiscentes

Los materiales radiofotoluminiscentes (RFL) usados comúnmente son vidrios de metafosfato de aluminio y litio con impurezas de plata como activadores. Estos iones de plata, situados en posiciones intersticiales de la red de metafosfato capturan los electrones que fueron liberados por la acción de la radiación sobre el material RFL. Después de irradiados, los vidrios RFL emiten luz en la región visible del espectro cuando se les excita con luz ultravioleta.

Las características principales de estos detectores son: su tamaño pequeño, su amplio intervalo de respuesta y su alta estabilidad; sin embargo, presentan una fuerte dependencia de la energía de la radiación a bajas energías, por lo que deben estar provistos de filtros metálicos para compensar dicha dependencia.

El sistema de lectura también es sencillo, consiste de una fuente de luz ultravioleta para excitar el detector, un dispositivo sensible a la luz y un sistema electrónico con la finalidad de amplificar la señal eléctrica producida. [12]

1.4.6. Detectores Termoluminiscentes

Muchos materiales, en particular plásticos y cristales emiten luz cuando son calentados después de haber sido expuestos a la radiación y se denominan materiales termoluminiscentes.

La absorción de energía de la radiación por el material excita los átomos, dando lugar a la producción de electrones libres que pasan de la banda de valencia, donde sólo pueden existir ligados a grupos de átomos, a la banda de conducción, donde pueden moverse libremente. La mayoría de los electrones regresan inmediatamente a su estado energético original, pero unos pocos quedan atrapados en impurezas existentes en el cristal termoluminiscente. [13]

Cuando el cristal es calentado estos electrones atrapados son elevados a niveles energéticos más altos que aquellos en los que se encuentran, también conocida como banda de conducción, desde la cual pueden regresar a su estado normal. Cuando esto ocurre hay emisión de luz y la cantidad total emitida es proporcional al número total de electrones atrapados, los cuales a su vez son proporcionales a la cantidad de energía absorbida de la radiación.

Los detectores termoluminiscentes responden cuantitativamente a rayos X, beta, gamma, electrones y protones. [12]

CONCLUSIONES

En general los materiales de detección de radiación han mantenido un crecimiento constante en el mercado los últimos quince años. La demanda actual de este tipo de materiales es en área de imagen médica y seguridad dosimétrica. Los materiales de detección de radiación con mayor demanda en el mercado son los basados en centelleo y los semiconductores.

Los detectores de radiación basados en centelleo son actualmente una de las soluciones prácticas en cuestión de costos para grandes áreas que necesiten un arreglo de detectores para el uso de imagen médica y aplicaciones de seguridad tales como fugas de radiación. Sin embargo las mejoras en su resolución, eficiencia y sensibilidad son necesarias para su uso.

Capítulo 2

Síntesis de Plástico Centellador

2.1. Proceso de síntesis de plástico centellador

En este capítulo se reporta el proceso de síntesis de tres muestras de plástico centellador compuestos por una base de monómero de estireno y dopados con diferentes proporciones de moléculas de 2,5 - *di feniloxazol* conocida comúnmente como *PPO* y la molécula 1,4-*bis-2-(5-phenyloxazolyl)benzeno* conocida comúnmente como *POPOP* mediante un proceso de polimerización por radicales libres.

2.1.1. Proceso de polimerización

Los polímeros o plásticos son producidos tras un proceso denominado **polimerización** que consiste en enlazar mediante enlaces covalentes miles de pequeñas moléculas orgánicas denominadas monómeros o meros.

Los monómeros son moléculas orgánicas fundamentalmente formadas por átomos de carbono, hidrógeno y oxígeno entre los cuales se establecen uniones, o lo que son denominados enlaces covalentes.

Para la síntesis de las muestras de plástico centellador que se elaboró se utilizó el proceso llamado polimerización por mecanismo de adición en el que las moléculas de monómero se activan por efecto de la temperatura, presión o catalizador produciendo la rotura de los dobles enlaces y permitiendo las uniones entre los meros completando las cadenas siempre que existan electrones libres en el terminal de la cadena polimérica en formación. La polimerización termina cuando esta posibilidad queda inhibida o cancelada.

Algunos ejemplos de polímeros obtenidos por este procedimiento aparecen en la figura 2.1.

Este proceso de polimerización presenta tres etapas características:

Etapas de inicialización. Provocada por la acción de peróxidos orgánicos, estos mediante calor o radiación rompen su estructura para dar lugar a radicales libres (con electrones libres) que obligan al desdoblamiento del doble enlace.

CAPÍTULO 2 SÍNTESIS DE PLÁSTICO CENTELLADOR

2.1. PROCESO DE SÍNTESIS DE PLÁSTICO CENTELLADOR

Etapa de propagación. Se produce el crecimiento de la cadena de un modo espontáneo.

Etapa de terminación. El crecimiento de la cadena acabada cuando se produce la unión del extremo de la cadena en crecimiento con un radical libre (finalizador) o por la unión de los extremos de dos cadenas en crecimiento simultáneo. [16]

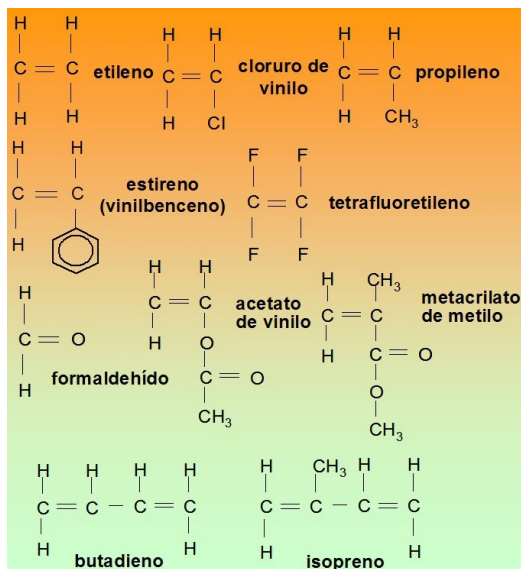


FIGURA 2.1: Monómeros que siguen el mecanismo de polimerización por adición de radicales libres [16].

Las reacciones de polimerización son el conjunto de reacciones químicas en las cuales un monómero iniciador o endurecedor activa a otro monómero comenzando una reacción en cadena la cual forma el polímero final. (Figura 2.2)

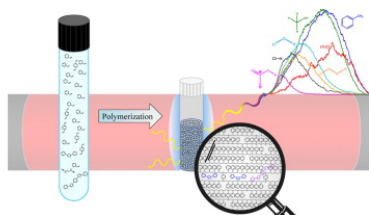


FIGURA 2.2: Espectro de radiaciones electromagnéticas ionizante/ no ionizante.

El proceso más utilizado en la actualidad para el poliestireno se basa en la polimerización radical en masa. *Radical* significa que la reacción es iniciada por radicales libres, generados térmicamente mediante moléculas específicas denominadas iniciadores. En *masa* significa que el medio de adición está formado esencialmente por estireno y poliestireno, añadiéndose a veces otro hidrocarburo inerte perfectamente miscible con el estireno, a menudo algún tipo de catalizador, que sirve para moderar la velocidad de reacción.

En el proceso de polimerización por radicales libres, los radicales de estireno se forman espontáneamente a mayor velocidad cuanto mayor sea la temperatura.

CAPÍTULO 2 SÍNTESIS DE PLÁSTICO CENTELLADOR
2.1. PROCESO DE SÍNTESIS DE PLÁSTICO CENTELLADOR

2.1.2. Dopantes

Los dopantes son sustancias que se añaden en pequeñas proporciones al material con el fin de crear un cambio en sus propiedades. En el proceso de síntesis de las muestras de plástico centellador se utilizaron dos tipos diferentes de moléculas dopantes con características diferentes.

2,5-diphenyloxazole (PPO)

La molécula 2,5-diphenyloxazole, comúnmente conocida como PPO tiene las características que se muestran en la tabla 2:

Fórmula	$C_{15}H_{11}NO$
Fracciones de masa	C(carbono) 81,4 %, H(hidrógeno) 5,01 %, N(nitrógeno) 6,33 %, O(oxígeno) 7,23 %
Masa molar	221,254g/mol
Densidad	1,094g/cm ³
Rango estándar de excitación (nm)	280-350
Rango estándar de emisión estándar (nm)	330-480

Tabla 2. Propiedades de molécula de PPO

La estructura molecular de PPO se muestra en la figura 2.3

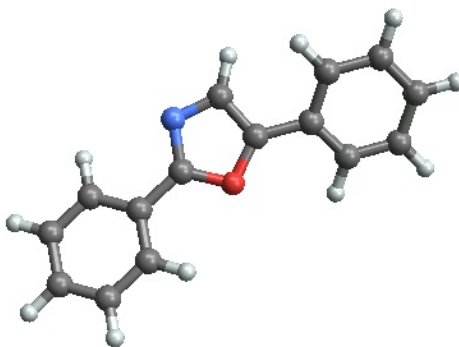


FIGURA 2.3: Estructura de moécula de PPO [7]

1,4-Bis(5-phenyl-2-oxazolyl)benzeno (POPOP)

La molécula 1,4-Bis(5-phenyl-2-oxazolyl)benzeno comúnmente conocida como POPOP tiene las características que se muestran en la tabla 3:

Fórmula	$C_{24}H_{16}N_2O_2$
Fracciones de masa	C(carbono) 79,1 %, H(hidrógeno) 4,43 %, N(nitrógeno) 7,69 %, O(oxígeno) 8,78 %
Masa molar	364,396g/mol
Rango estándar de excitación (nm)	280-390
Rango estándar de emisión estándar (nm)	370-540

Tabla 3 Propiedades de molécula de POPOP

CAPÍTULO 2 SÍNTESIS DE PLÁSTICO CENTELLADOR

2.1. PROCESO DE SÍNTESIS DE PLÁSTICO CENTELLADOR

La estructura molecular de POPOP se muestra a continuación en la figura 2.4.

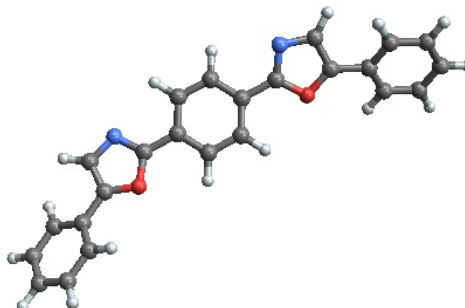


FIGURA 2.4: Estructura de moécula de POPOP [7]

El dopamiento de las muestras permite una reacción en cadena la cual se caracteriza por la absorción de radiación ultravioleta cuyo rango de longitud de onda se encuentra entre 200 nm y 380 nm para posteriormente emitir radiación visible de longitud de onda de 450 nm aproximadamente. El proceso que se lleva a cabo es el siguiente:

- La molécula de PPO permite que el plástico sea capaz de absorber radiación de luz ultravioleta.
- PPO absorbe la radiación ultravioleta y emite en un rango de 330 nm. a 440 nm. aproximadamente, teniendo un rango máximo de emisión entre 360 nm. y 380 nm.
- Dado que la molécula de POPOP tiene su máximo rango de absorción entre 340 nm. y 380 nm., absorbe la radiación emitida por la molécula de PPO, para después emitir en un rango entre 410 nm y 450 nm., esto significa que el proceso final en el plástico termina emitiendo luz de color azul.

Un ejemplo de espectros de emisión y absorción de POPOP y PPO se ilustran en la figura 2.5, donde las moléculas se encuentran disueltas en etanol.

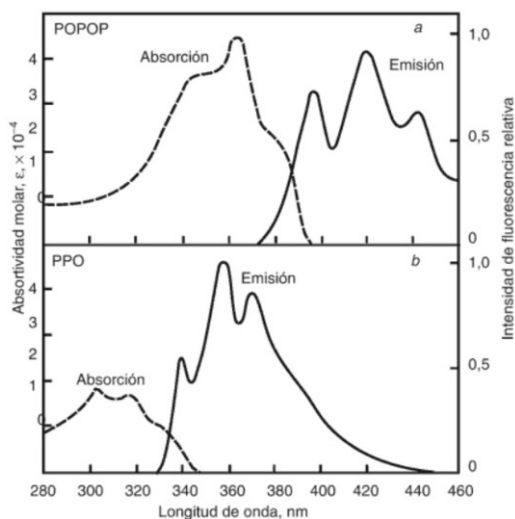


FIGURA 2.5: Espectros de emisión de PPO y POPOP disueltos en Etanol [8].

2.1.3. Catalizador

Algunas reacciones químicas se aceleran bajo la influencia ejercida por algunas sustancias que, al término del proceso resultan ser inalteradas. Éstas sustancias se denominan catalizadores y el efecto que producen se llama catálisis.

Para que se inicie una reacción química se requiere que los cuerpos reaccionantes posean un nivel mínimo de energía de activación. La presencia de un catalizador en la síntesis de un material hace que este nivel se alcance antes.

Algunas características de los catalizadores son:

- No se altera la composición de los catalizadores en las reacciones químicas en que intervienen.
- Pequeñas cantidades de catalizador son suficientes para acelerar el proceso de grandes cantidades de reactantes.
- Los catalizadores únicamente pueden modificar, aumentar o disminuir la velocidad de reacción, pero no pueden provocar la reacción.
- Son específicos a la reacción a tratar.

Los catalizadores no alteran el balance energético final de la reacción química entre los compuestos del material a formar, sino que sólo permiten que se alcance el equilibrio con mayor o menor velocidad.

Para la síntesis de las muestras de plástico centellador conocido comúnmente como *Peróxido de Benzoyl*, cuya fórmula molecular es $C_{14}H_{10}O_4$, cuya estructura se presenta en la figura 2,3.

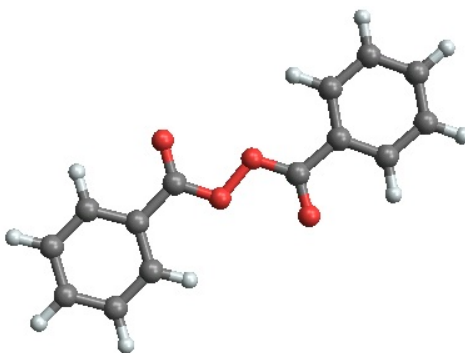


FIGURA 2.6: Estructura de molécula de catalizador (Peróxido de Benzoyl)[7].

Capítulo 3

Caracterización de muestras de plástico centellador

En este capítulo se aborda el tema de la caracterización de tres muestras de plástico centellador mediante métodos ópticos.

3.1. Definición y Clasificación de los métodos ópticos de análisis

Se definen como métodos ópticos de análisis a aquellos que miden la radiación electromagnética que emana de la materia o que interacciona con ella. Se incluyen por lo tanto, todos los campos del espectro electromagnético desde los rayos gamma a las ondas de radio. También se estudian todas las formas de obtención de la radiación electromagnética, así como su interacción con la materia, incluyéndose emisión, transmisión, absorción, dispersión, refracción, difracción, interferencias y polarización por mencionar algunos. A continuación se describen los métodos de absorción, emisión y reflexión ya que son los métodos ópticos que se utilizaron para el análisis de la respuesta de las muestras de plástico centellador.

3.2. Tipos de espectros y mecanismos de interacción

Todos los espectros pueden dividirse en tres tipos fundamentales: espectros de emisión, de absorción y Raman. En la tabla 3.1 se clasifican los métodos espectroscópicos en función de estos tres tipos de espectros. A continuación se describen los principios básicos y las características que diferencian a cada uno de ellos.

3.2.1. Espectros de Absorción

Como puede observarse en la TABLA 3.1, la absorción es un proceso fundamental entre los métodos espectroscópicos en todo el espectro electromagnético, que abarca desde la

CAPÍTULO 3 CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS DE PLÁSTICO CENTELLADOR

3.2. TIPOS DE ESPECTROS Y MECANISMOS DE INTERACCIÓN

región de los rayos gamma a la región de las radiofrecuencias. El proceso de absorción puede representarse de un modo sencillo por las reacciones:



Donde X representa la energía inicial que tienen un material y $h\nu$ representa una nueva energía que se le proporciona a un material, dando como resultado una nueva energía X^* , que en un proceso posterior a la absorción puede liberar este exceso de energía mediante algún proceso de emisión, por ejemplo *calor*. La ecuación en general (3-1) engloba todos los procesos de absorción de importancia, mientras que la (3-2) representa la disipación posterior de la energía absorbida, generalmente debida a colisiones con otros átomos o moléculas. En general, la disipación de energía (3-2) no se considera cuando se estudian procesos de absorción, debido a que la cantidad de calor liberado es generalmente despreciable; sin embargo, su consideración es importante para comprender el espectro de absorción y para distinguirlo del de fluorescencia y de otros espectros.

Espectros de absorción	Espectros de Emisión	Espectros Raman
Espectrofotometría de ultravioleta y visible	Espectroscopía de emisión	Espectroscopía Raman
Espectrofotometría de infrarojo	Espectrofotometría de llama	
Absorción atómica	Espectrofluorimetría	
Espectroscopía de microondas	Espectro-fosforimetría	
Espectroscopía de absorción de rayos X	Espectroscopía de rayos gamma	
Espectroscopía de resonancia magnética nuclear (rmn)		
Espectroscopía de resonancia de spin electrónico (rse)		

TABLA 3.1 Clasificación de los métodos espectroscópicos según los tipos de espectros que presentan [9]

Para que radiación electromagnética sea absorbida por la materia deben cumplirse dos condiciones generales:

(1) La primera de ellas es que *debe haber una interacción entre el campo eléctrico de la radiación y alguna carga eléctrica de la sustancia.*

(2) *La energía de la radiación debe ser exactamente igual a la energía cuantizada que requiere la sustancia.* Así cada sistema elemental, tanto si es un núcleo o es un átomo o una molécula tiene un número de estados cuantizados, y si la radiación incidente tiene demasiada o poca energía para satisfacer una transición entre los niveles de energía permitidos, será transmitida sin absorción. La energía o frecuencia que debe tener el fotón incidente para poder ser absorbido viene dada por la ecuación de Bohr:

$$h\nu = E_f - E_i \quad (3.3)$$

donde E_f y E_i son respectivamente las energías de los estados final e inicial del material. Según la ecuación anterior E_i representa la energía del material X en el estado fundamental

CAPÍTULO 3 CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS DE PLÁSTICO CENTELLADOR

3.2. TIPOS DE ESPECTROS Y MECANISMOS DE INTERACCIÓN

y E_f representa un estado permitido de energía superior que se representa por la especie excitada X^* . La vida media de un átomo o una molécula excitados X^* sobre los que no actúa ningún efecto externo, se estima en unos 10^{-8} s, sin embargo dicho tiempo puede variar dependiendo del material a considerar.

3.2.2. Espectros de Emisión

Los espectros de emisión se deben a un proceso que es exactamente inverso al de absorción:



De modo que el material pasa de un estado excitado X^* (de elevada energía) a uno de menor energía y emite radiación. Pueden identificarse tres clases diferentes de procesos de emisión, que difieren en como la sustancia alcanza el estado excitado previo a la emisión.

Emisión del núcleo radiactivo. Los núcleos de las sustancias radiactivas, naturales o producidas pueden desintegrarse espontáneamente emitiendo rayos gamma. La intensidad de la radiación en función de la energía da lugar a un espectro de rayos gamma que es característico del núcleo emisor. El único método espectroscópico basado en este tipo de emisión es la espectroscopía de rayos gamma.

Emisión después de la absorción de radiación electromagnética. en este tipo de emisión las sustancias pasan de un estado excitado al estado fundamental cediendo el exceso de energía en forma de calor, sin embargo algunas sustancias o materiales pueden desactivarse por otros mecanismos de emisión como son la *resonancia*, la *fluorescencia* y la *fosforescencia*.

La *emisión por resonancia* es un fenómeno muy poco frecuente y que tiene lugar cuando un átomo o una molécula que ha absorbido una determinada radiación vuelve al estado fundamental emitiendo radiación de la misma frecuencia que la absorbida.

Las *emisiones por fluorescencia y fosforescencia* son reemisiones de radiación de longitud de onda superior a la radiación absorbida. Las emisiones tienen una longitud de onda superior a la radiación incidente debido a que parte de esta radiación se pierde con otros modos de desactivación.

En general la absorción da lugar a una excitación vibracional así como electrónica, y si una sustancia se encuentra en un estado electrónico excitado que es mas estable que el usual (condición necesaria para que una sustancia o material sea fotoluminiscente), la especie excitada puede sufrir una desactivación vibracional debido a colisiones con las especies vecinas; una vez en el estado fundamental vibracional puede regresar al estado fundamental electrónico mediante la emisión de radiación. Este proceso se representa en la figura 3.1, en la que se comparan las transiciones entre los niveles energéticos que intervienen en los espectros de absorción, emisión y Raman.

La fluorescencia y fosforescencia se distinguen por el tiempo transcurrido entre la absorción y la reemisión de la radiación de la radiación. Así en la fluorescencia el tiempo transcurrido entre la absorción y la reemisión es únicamente de unos 10^{-4} a 10^{-8} s, de

**CAPÍTULO 3 CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS DE PLÁSTICO
CENTELLADOR**

3.2. TIPOS DE ESPECTROS Y MECANISMOS DE INTERACCIÓN

modo ue la reemisión parece que sea instantánea y cesa tan pronto como se deja de irradiar. En cambio, en la fosforescencia el intervalo es mayor, del orden de los 10^{-4} a 10 s o incluso superior. En el diagrama de energías de la figura 3.1 se representan los niveles de energía electrónicos de los electrones de enlace en una molécula, el espacio entre los estados electrónicos corresponde a energías en la zona del ultravioleta o del visible del espectro. [9]

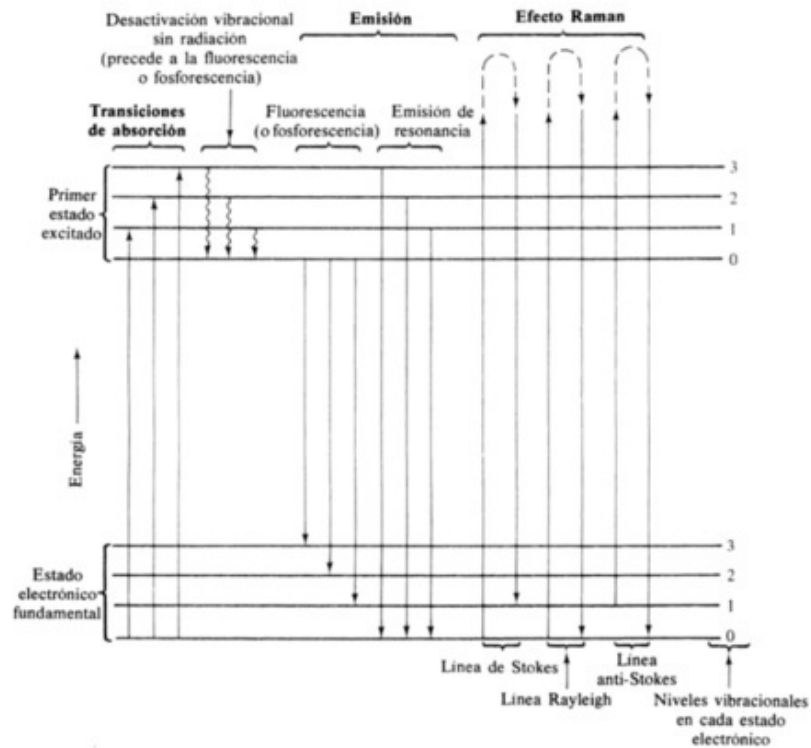


FIGURA 3.1: Transiciones de los niveles de energía que intervienen en los espectros de absorción, emisión y Raman [9].

3.2.3. Espectros de transmitancia

Una de las propiedades ópticas importantes de un material es la transmitancia. La transmitancia es la fracción de radiación incidente transmitida por un material.

La fracción de luz transmitida T esta dada por:

$$T = \frac{I}{I_0} = (\epsilon)^{-abC} \tag{3.5}$$

- siendo I_0 = intensidad incidente
- I = intensidad transmitida
- a = capacidad de absorción del material
- b = longitud de material

**CAPÍTULO 3 CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS DE PLÁSTICO
CENTELLADOR**
3.2. TIPOS DE ESPECTROS Y MECANISMOS DE INTERACCIÓN

C = concentración de la especie absorbente

y la fracción de la luz absorbida será pues:

$$1 - \frac{I}{I_0} = 1 - (\epsilon)^{-abC} \quad (3.6)$$

La transmitancia se expresa a menudo como porcentaje:

$$\%T = \frac{I}{I_0} * 100 \quad (3.7)$$

3.2.4. Reflectancia

Se produce reflexión siempre que incide radiación en la interfase entre dos materiales de índice de refracción distinto. Se conoce como *reflectancia* ρ (o bien como poder de reflexión) a la relación entre la intensidad de la radiación reflejada y la de la radiación incidente en la interfase. Para un ángulo de incidencia θ_i , la reflectancia será mayor cuanto mayor sea el índice de refracción del medio 2, aunque también interfiere el medio 1. Suponiendo que la radiación incide perpendicularmente sobre la interfase que separa el medio 1 del medio 2, lo cual puede considerarse un ejemplo de lo que ocurre cuando una radiación atraviesa una muestra; en este caso la reflectancia puede calcularse a partir de:

$$\rho = \frac{I_R}{I_0} = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2} \quad (3.8)$$

donde

I_R = Intensidad reflejada

I_0 = Intensidad incidente

n_1, n_2 = índices de refracción

3.2.5. Fluorescencia

La espectrometría de fluorescencia es otro tipo de método de análisis óptico de un material. En el proceso, sobre la muestra se incide un haz de luz lo que genera que fotones sean absorbidos lo cual provoca que los electrones de las moléculas por las que esta compuesto la muestra sean excitados. Después de un tiempo T_0 los electrones excitados regresan a su estado electrónico basal (estado de baja energía) al emitir fotones.

Los fluoruros son moléculas fluorescentes que tienen un espectro de absorción y de emisión bien definidos. Existe una diferencia entre los picos de absorción y emisión de

CAPÍTULO 3 CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS DE PLÁSTICO CENTELLADOR

3.2. TIPOS DE ESPECTROS Y MECANISMOS DE INTERACCIÓN

un flúoruro, esto es, la intensidad de su fluorescencia emitida varía con la longitud de onda de excitación, pero no varía la distribución de su espectro, un ejemplo de ello se puede observar en la FIGURA 3.2. Entre los más utilizados se pueden encontrar moléculas orgánicas simples y algunas proteínas flúorescentes [8].

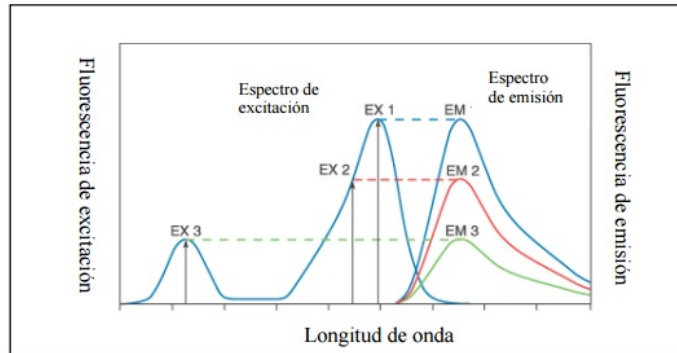


FIGURA 3.2: La excitación de un flúoruro a tres diferentes longitudes de onda (EX 1, EX 2, EX 3) no cambia el perfil de emisión, pero produce variaciones en la intensidad de emisión de fluorescencia (EM 1, EM 2, EM 3) que corresponden a la amplitud del espectro de excitación [8].

Dado que la eficiencia para la recolección de luz de un plástico centellador puede ser muy baja es necesario que mediante algún mecanismo el material sea acoplado a un fotomultiplicador. La forma más común para acoplar un material centellador a un fotomultiplicador es mediante una fibra de corrimiento de longitud de onda.

La fibra de corrimiento de longitud de onda (WLS por sus siglas en inglés) absorbe la luz emitida por el centellador y emite fotones en una longitud de onda mayor, mismos que son guiados hacia el fotomultiplicador mediante el proceso de reflexión total interna. El núcleo de las fibras por lo general está dopado con un flúoruro y se encuentran recubiertos por alguna película transparente delgada de PMMA (polimetil metacrilato) con un índice de refracción menor al del núcleo. La reflexión total interna en la interfaz entre el núcleo y el recubrimiento hace posible el transporte de luz. [5]

La dirección de los fotones emitidos por la fibra no está relacionada con la dirección de la luz de centelleo de entrada. Un ejemplo del acoplamiento del centellador con la fibra de corrimiento de longitud de onda se muestra en la FIGURA 3.3. [19]

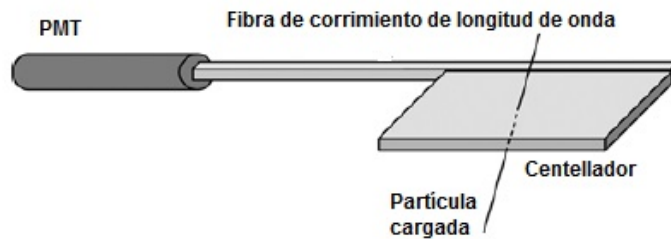


FIGURA 3.3: Material centellador acoplado a PMT mediante fibra corrimiento de longitud de onda [19].

En particular, para un plástico centellador eficiente se requiere de alta transmitancia

**CAPÍTULO 3 CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS DE PLÁSTICO
CENTELLADOR**
3.2. TIPOS DE ESPECTROS Y MECANISMOS DE INTERACCIÓN

y fluorescencia y poca reflectancia.

Capítulo 4

Simulación de muestras de plástico centellador

En este trabajo se realizó la simulación de las muestras de plástico centellador que se elaboraron en el laboratorio de materiales de la facultad. Se realizaron pruebas con diversas plataformas de software como Geant4, GATE y TOPAS.

Se eligió TOPAS para la simulación de los plásticos dado que es una herramienta que nos permite simular el paso de partículas a través de la materia lo cual también es posible hacer en Geant4, sin embargo TOPAS provee de geometrías, materiales y elementos particulares del área de la medicina pues nos permite modelar rayos X y cabezas de tratamiento de terapias de partículas como fuentes de radiación. TOPAS es una herramienta de simulación que Geant4 proporciona para hacer simulaciones Monte Carlo avanzadas más fácilmente de todas las formas de radioterapia para su uso en la física médica. [22]

El trabajo de simulación se dividió en etapas, la primera se refiere a la creación de un nuevo material en el ambiente de TOPAS. La segunda parte se definió la geometría, es decir de las formas que tienen los plásticos centelladores que se realizaron en el laboratorio. La tercera etapa consta del proceso de radiación del plástico, en esta se definen las condiciones con las que el plástico fue irradiado tales como rango de energía y el tipo de fuente. La última etapa consta de la recolección de datos obtenida de la simulación. La información obtenida permitirá saber si las muestras simuladas pueden ser monitores de radiación.

4.1. Definición de material

En la primera etapa que se refiere a la definición del nuevo material centellador, fue necesario la creación del plástico como un nuevo material que se agregó a la lista de materiales con los que se puede trabajar en TOPAS. Para esta parte fue necesario conocer los componentes químicos del plástico, que se mencionaron en el capítulo 2.

TOPAS cuenta con una base de datos que proporciona la información necesaria de los elementos químicos, mismos que son necesarios para poder definir nuevas moléculas, materiales y compuestos, sin embargo, si es necesario es posible crear nuevos materiales

CAPÍTULO 4 SIMULACIÓN DE MUESTRAS DE PLÁSTICO CENTELLADOR

4.2. DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA

utilizando la información con la que TOPAS cuenta en su base de datos.

Así por ejemplo, para definir el material centellador comercial, es necesario hacer uso de la información acerca de la composición del mismo. La forma en la que se define un nuevo material en TOPAS esta dada en función de los elementos químicos que la componen, las fracciones de cada uno de ellos y su densidad.

Un ejemplo de como se define la composición de un plástico centellador es la siguiente:

```
sv:Ma/Centellador/Components = 2 "Carbon" "Hydrogen"  
uv:Ma/Centellador/Fractions = 2 0.9226 0.0774  
d:Ma/Centellador/Density = 1.06 g/cm3
```

donde, los componentes y las fracciones pueden variar dependiendo el tipo de material que se desee construir en TOPAS. Además a los materiales que se definan, es posible asignarles características especiales con el fin de distinguirlas entre las demás, por ejemplo, el color:

```
s:Ma/Centellador/DefaultColor = "blue"
```

Una vez que fue definido el material y su composición se puede pasar a la etapa de la definición de la geometría.

4.2. Definición de la geometría

La forma en que se define la geometría para cierto material en TOPAS es haciendo uso de las entidades geométricas con las que TOPAS y Geant4 cuentan, algunas de ellas se muestran en la FIGURA 4.1.

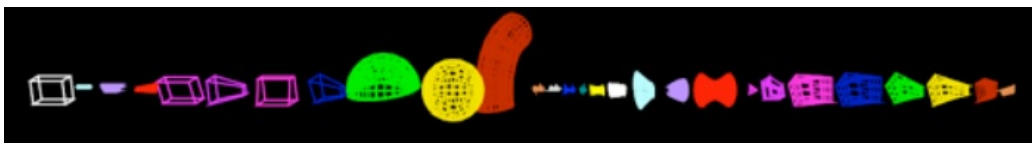


FIGURA 4.1: Ejemplo de entidades geométricas en TOPAS.[22]

TOPAS permite definir diferentes entidades geométricas como cubos, prismas, conos, cilindros, entre otras y a su vez crear figuras más complicadas haciendo uso de las existentes o incluso crear una nueva forma en función de las necesidades del programador.

4.3. Fuente de partículas

Como se mencionó en el capítulo 1 se tienen diversas fuentes de radiación tanto naturales como artificiales. TOPAS permite simular tres tipos diferentes de fuentes de radiación.

**CAPÍTULO 4 SIMULACIÓN DE MUESTRAS DE PLÁSTICO
CENTELLADOR**
4.3. FUENTE DE PARTÍCULAS

Además es posible definir una nueva fuente de partículas, por ejemplo de protones, electrones, fotones, gamma, alpha, entre otras. A dichas fuentes se les puede dar algunos atributos como la energía del haz, la forma, el tamaño, etc.

El código de la fuente de radiación se encuentra en el apéndice.

Capítulo 5

Metodología de experimento

En este capítulo se describen los métodos utilizados en el proceso de síntesis caracterización y simulación de las muestras del plástico centellador.

5.1. Metodo de síntesis de muestras de plástico centellador

Mediante el proceso de polimerización descrito en la sección 2,1,1 se llevó a cabo la síntesis de tres muestras de plástico centellador, con diferentes proporciones de PPO y POPOP, para escoger aquella que emite radiación (luz color azul) con mayor intensidad.

Para la elaboración de las primeras muestras de plástico centellador se obtuvo información de la página de internet de la Universidad Nacional de la Plata de Argentina [25]. Posteriormente para las replicas de plástico centellador se realizó un proceso de experimentación factorial cuyo diseño consta de dos o más factores, cada uno de los cuales tienen distintos valores, en este caso el factor es el peso de los compuestos, los cuales se varían uno en uno hasta encontrar las proporciones en las que el material plástico tenga mayor emisión óptica. Este tipo de experimento nos permitió observar el efecto que causa cada factor sobre la variable de respuesta que en este caso corresponde a la fluorescencia.

Cada una de las muestras que se realizaron llevaron procesos de endurecimiento diferentes dado que en plásticos elaborados anteriormente se observó que la consistencia de los plásticos era diferente como consecuencia de este proceso de endurecimiento.

El proceso que se llevó a cabo para la elaboración de las muestras de plástico con diferentes técnicas de secado se listan a continuación:

- En un vaso de precipitados se vierten las proporciones de los reactivos. Figura 2.9
- Mezclar hasta obtener una mezcla homogénea.
- **Proceso de endurecimiento para la muestra 1.** Se introdujo la mezcla en el horno a 90° C por 3 días. Se dejó reposar a temperatura ambiente 1 día.
- **Proceso de endurecimiento para la muestra 2.** Se introdujo la mezcla en el horno a 90° C por 20 min. Se dejó reposar a temperatura ambiente por 1 día.

CAPÍTULO 5 METODOLOGÍA DE EXPERIMENTO

5.1. METODO DE SÍNTESIS DE MUESTRAS DE PLÁSTICO CENTELLADOR

- **Proceso de endurecimiento para la muestra 3.** El proceso de endurecimiento para esta muestra fue a temperatura ambiente por 3 días.

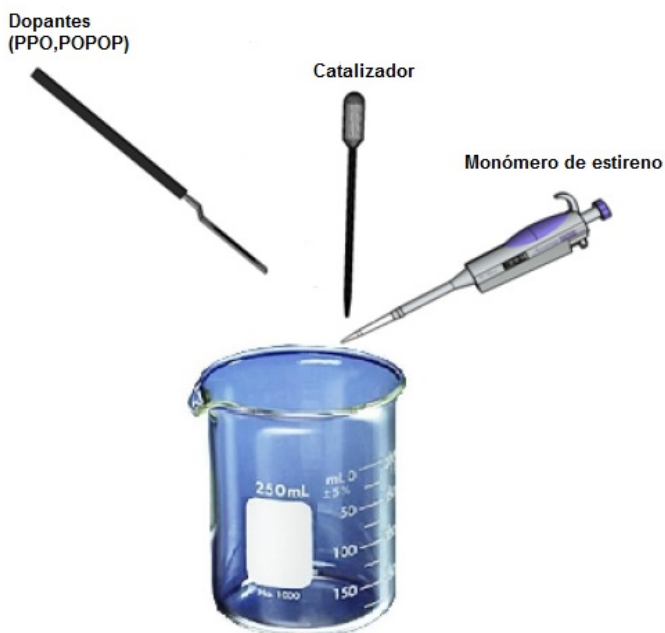


FIGURA 5.1: Vaso de precipitado con reactivos para síntesis de muestras de plástico centellador.

Los reactivos que se utilizaron tienen el peso en gramos por mol y se presentan en la tabla 5.1.1:

PPO	3.7581 g/mol
POPOP	0.0357 g/mol
Monómero de Estireno	104.149 g/mol
Catalizador	1.4532 g/mol

Tabla 5.1.1 Pesos de los reactivos.

En la Tabla 5.1.2 se muestran las concentraciones de los reactivos de cada muestra de plástico centellador.

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
PPO	0.836 g	0.668 g	0.499 g
POPOP	0.0079 g	0.006355 g	0.0047 g
Monómero de Estireno	25 g	20 g	15 g
Catalizador	0.323 g	0.258 g	0.193 g

Tabla 5.1.2 Concentraciones de reactivos demuestras de plástico centellador

Una vez que se obtuvieron las muestras con diferentes concentraciones de reactivos y diferentes procesos de endurecimiento se procedió a la caracterización de las mismas.

5.2. Métodos de Caracterización de muestras de plástico centellador

Se realizó la caracterización de cada una de las muestras con un espectrofotómetro que cuenta con una fuente de luz de halógeno Ocean Optics como la que se muestra en la figura 5.2



FIGURA 5.2: Fuente de luz de Halógeno Ocean Optics. (www.oceanoptics.com)

En la FIGURA 5.3 se presenta una de las muestras de plástico centellador al ser irradiada por la fuente.

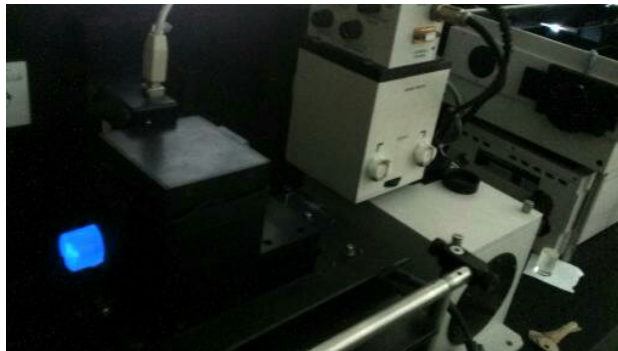


FIGURA 5.3: Muestra de plástico centellador al ser irradiada por la fuente.

Los resultados de la caracterización se presentan en el capítulo 6.

5.3. Métodos de la Simulación de las muestras de plástico centellador.

Para la simulación de las muestras de plástico centellador en primer lugar se definió la forma de los mismos.

En este caso las muestras que se realizaron en el laboratorio fueron cilíndricas de 2 cm de diámetro por 3 cm de largo y por lo tanto en la simulación se definieron del mismo tamaño.

La simulación de la geometría de las muestras puede observarse en la FIGURA 5.4. El código de la simulación de la geometría de una de las muestras se encuentra en el apéndice A

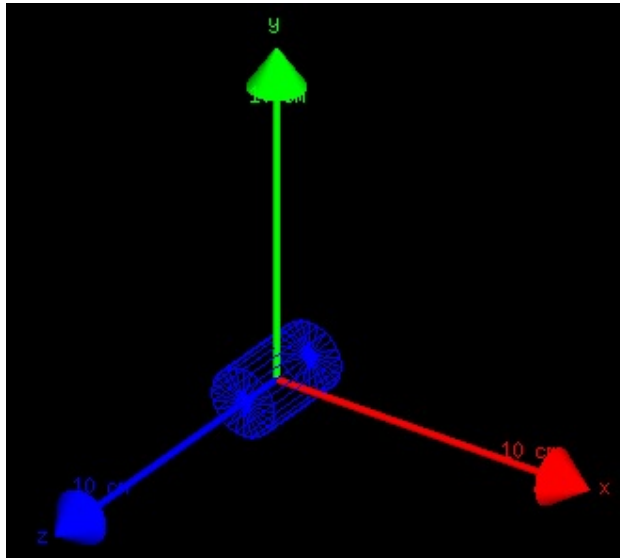


FIGURA 5.4: Simulación de la geometría de una de las muestras de plástico centellador en TOPAS.

En este caso, como fuente de radiación se simuló un haz de electrones con una energía de 6 MeV que TOPAS tiene por default. Se consideró esta energía ya que se encuentra en el rango de energía clínico. La geometría de la muestra de plástico centellador es irradiada por esta fuente a una distancia de 1 m respecto a la superficie del plástico. En la figura 4.2 se puede ver un ejemplo de la muestra irradiada.

Capítulo 6

Resultados de la caracterización y simulación de los plásticos centelladores.

Resultados de caracterización

Las muestras de plástico centellador sin ser acoplado a la fibra de corrimiento de longitud de onda presentó fluorescencia en la longitud de onda correspondiente al azul, como se esperaba dado que el proceso en cadena generado por la interacción de la luz de la fuente con las moléculas del plástico (PPO y POPOP) generan una emisión en el intervalo de longitud de onda de 410 a 450 nm como se mencionó en la sección 2.1.2. En la gráfica 6.1 se presentan los espectros de fluorescencia de las muestras cuando son irradiados con la lámpara de halógeno descrita en el capítulo anterior con un filtro que permite la emisión solamente de la longitud de onda del ultravioleta.

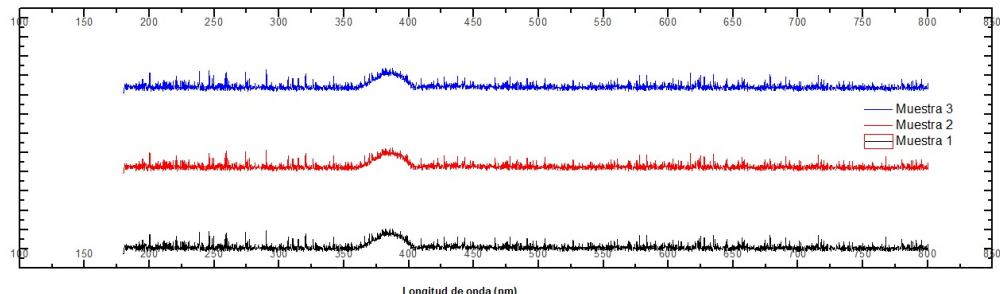


FIGURA 6.1: Espectros de fluorescencia de las muestras de plástico.

Los datos obtenidos muestran que el máximo valor de fluorescencia para las muestras es para la muestra 1 en 386.08 nm, para la muestra 2 en 387.02 nm y la muestra 3 en 386.05 nm.

Para una mejor apreciación, en la figura 6.2 se muestra el espectro de fluorescencia de la muestra 2 en el intervalo de 340 nm a 500 nm.

CAPÍTULO 6 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN Y SIMULACIÓN DE LOS PLÁSTICOS CENTELLADORES.

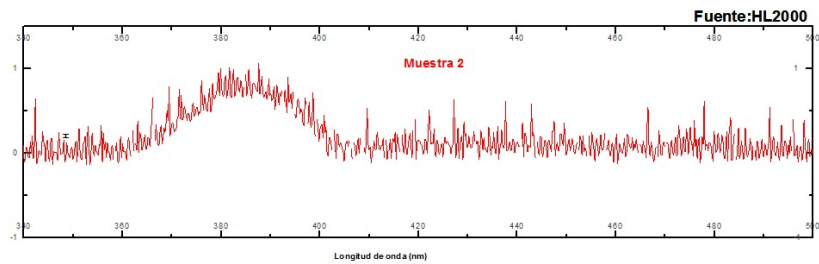


FIGURA 6.2: Espectro de fluorescencia de muestra 2 en el intervalo de 340 nm a 500 nm).

Los plásticos comerciales tienen un máximo valor de emisión que varía dependiendo de los requerimientos de cada experimento. En la siguiente imagen se muestra una gráfica del espectro de emisión de un plástico comercial cuyo valor máximo se encuentra en 370 nm.

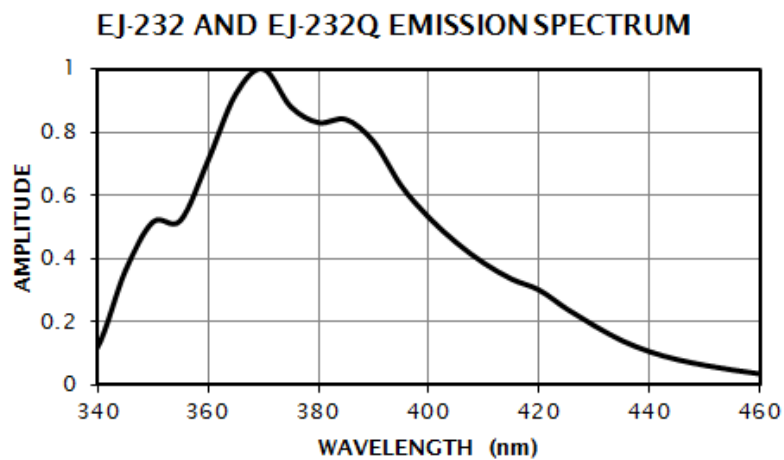


FIGURA 6.3: Espectros de fluorescencia de plástico comercial (Eljen Technology).

Al comparar el resultado de la muestra 2 respecto al plástico comercial EJ-232 se obtiene un porcentaje de error del 4.6 %.

Por otro lado, como se mencionó en la sección 3.2.5 las muestras pueden ser acopladas a una fibra de corrimiento de longitud de onda, la luz que es emitida por el plástico es absorbida por la fibra de corrimiento de longitud de onda, misma que reemite en la longitud de onda del color verde ¹. La gráfica 6.3 presenta los espectros de emisión de las tres muestras con la fibra acoplada.

Dado que nos interesa el fenómeno de transmitancia de las muestras, utilizando la ecuación 3.7 en la gráfica 6.4 se presentan los espectros de transmitancia de las muestras, donde I representa la intensidad de luz transmitida de cada muestra y I_0 corresponde a la luz transmitida por la fuente.

Se observa que las gráficas presentan ruido el cual lo atribuimos a la luz de fondo proveniente del ambiente.

¹www.crystals.saint-gobain.com/Scintillating_Fiber.aspx

CAPÍTULO 6 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN Y SIMULACIÓN DE LOS PLÁSTICOS CENTELLADORES.

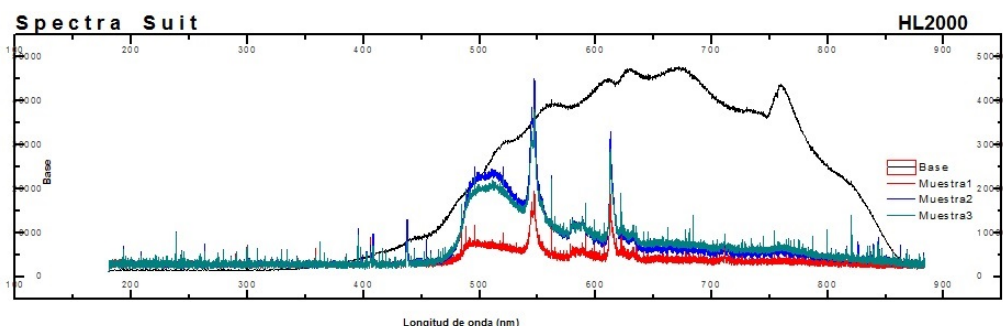


FIGURA 6.4: En color azul rojo y cian se presentan los espectros de emisión normalizados de las muestras de plástico centellador con fibra de corrimiento de onda acoplada, en color negro el espectro de emisión de la fuente que llamamos Base.

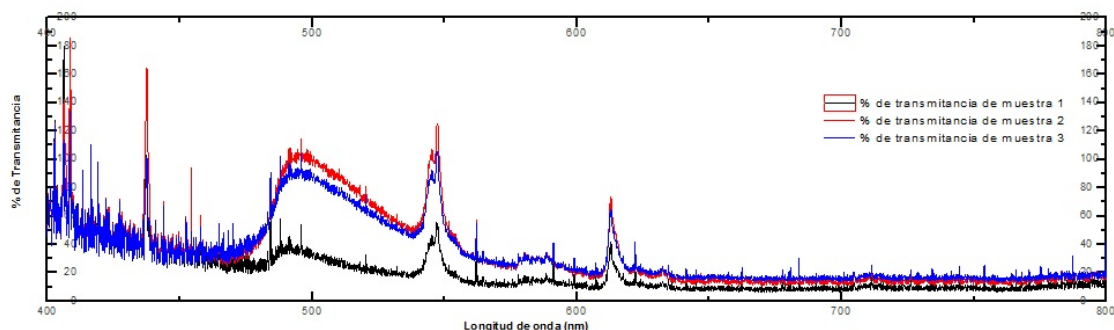


FIGURA 6.5: La gráfica presenta el porcentaje de transmitancia de las tres muestras de plástico centellador con la fibra de corrimiento de longitud de onda acoplada.

Resultados de simulación

TOPAS permite obtener los datos de la simulación mediante un módulo llamado *Scorer*. El *scorer* puede pensarse como el espacio fase en la simulación. Éste permite obtener la información sobre el tipo de partícula, energía, posición en X, Y y Z, esto en cualquier parte del entorno de la simulación que es conocido en TOPAS como *mundo*.

Dado que se requiere obtener información acerca de si el plástico centellador es capaz de monitorear radiación, se utilizó un *scorer* de superficie que proporciona la información acerca de la radiación que el material detecta.

Para la fuente de radiación de electrones de 6 MeV y 100000 historias, se colocó un *scorer* en la primera cara (cara frontal) del plástico que es la que recibe directamente la radiación de la fuente, así como también un *scorer* situado en la segunda cara (cara trasera).

Los resultados para la fuente de electrones con 100000 partículas fueron los siguientes y un campo de 2 cm * 2 cm:

ELECTRONES	Electrones	Fotones	Total de partículas
Cara Frontal	1977	53	2030
Cara Trasera	66	202	268

CAPÍTULO 6 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN Y SIMULACIÓN DE LOS PLÁSTICOS CENTELLADORES.

Los resultados para una fuente de partículas gamma con 100000 partículas fueron y un campo de 2 cm * 2 cm :

GAMMA	Electrones	Gamma	Total de partículas
Cara Frontal	2061	45	2106
Cara Trasera	61	241	302

Los resultados para una fuente de partículas fotones con 100000 partículas fueron y un campo de 2 cm * 2 cm :

FOTONES	Electrones	Gamma	Total de partículas
Cara Frontal	1997	43	2040
Cara Trasera	67	25	92

En la siguiente figura se presenta un ejemplo de la muestra simulada cuando es irradiada por partículas gamma (verde) con una energía de 6 MeV , en este proceso se crean electrones (rojo) y un protón (azul).

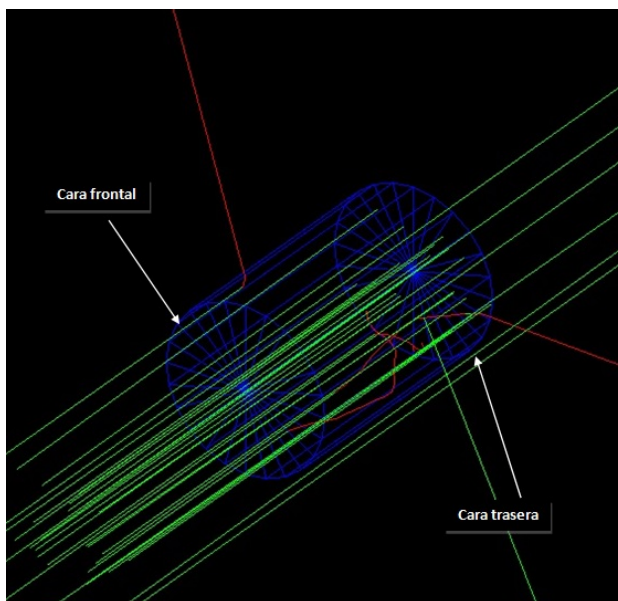


FIGURA 6.6: Ejemplo de muestra irradiada con partículas gamma.

Con estos resultados de la simulación podemos decir que la fuente de partículas gamma al irradiar a la muestra 2 detecta un mayor número total de partículas con respecto a la fuente de electrones con una diferencia del 3.6 % y con respecto a la fuente de fotones una diferencia de 3.1 % en la cara frontal. Mientras que el porcentaje de diferencia de la fuente de partículas gamma con respecto a la fuente de electrones es de 11.2 % y mientras que con respecto a la fuente de fotones la diferencia es de 69.5 % en la cara trasera.

Conclusiones y Discusión de resultados

Se desarrollaron tres muestras de plástico centellador con diferentes concentraciones de PPO y POPOP. Estas moléculas añadidas durante la polimerización tiene como resultado un material fluorescente en el rango de longitud de onda de 370 a 540 nm.

Durante el proceso de elaboración de muestras de plástico centellador se observó que algunas de las muestras realizadas tenían anomalías tales como burbujas, superficies opacas o incluso algunas resultaron con grietas. Éstos fenómenos los atribuimos a los procesos térmicos a los que se enfrentan durante su elaboración. De todas las muestras realizadas se seleccionaron las tres con menos anomalías.

Al realizar la caracterización óptica de las muestras se encontró que las muestras elaboradas imitan el comportamiento de plásticos centelladores comerciales. En particular la muestra 2 presentó una mayor emisión de luz en comparación con las muestras 1 y 3 ya que su máximo de emisión se encuentra en 387.02 nm, mientras que las de las muestras 1 y 3 tienen un valor respectivamente de 386.08 nm y 386.05 nm.

Al comparar este resultado en particular con el modelo EJ-232 de plástico centellador comercial de Eljen Technology cuyo valor máximo de emisión se encuentra en 370 nm. podemos decir que el valor máximo de emisión del plástico centellador elaborado se aproxima al del comercial con un porcentaje de error del 4.6

Por otro lado, dado que en particular es de interés una muestra que tenga una mayor emisión con el acoplamiento de la fibra óptica, se observa en la figura 6.3 que la muestra 2 tiene una mayor emisión respecto a las muestras 1 y 3.

La simulación de la muestra de plástico centellador irradiada con tres haces de partículas diferentes: electrones, fotones y partículas gamma con una energía de 6 MeV, cuando se irradia con una fuente de partículas gamma se tiene mayor número de detección en ambas caras de la muestra respecto a las fuentes de electrones y fotones. Se obtuvo que con respecto a la fuente de electrones con una diferencia del 3.6 % y con respecto a la fuente de fotones una diferencia de 3.1 % en la cara frontal. Mientras que el porcentaje de diferencia de la fuente de partículas gamma con respecto a la fuente de electrones es de 11.2 % y mientras que con respecto a la fuente de fotones la diferencia es de 69.5 % en la cara trasera.

Trabajo a futuro

Se realizarán las pruebas experimentales en las que las muestras de plástico centellador elaboradas serán irradiadas por un acelerador de partículas en el rango de energía clínico y se compararán los resultados obtenidos con los de la simulación.

Dado que se tiene el modelo de simulación del plástico elaborado es posible seguir con las pruebas de simulación, utilizando variación de parámetros para encontrar las variables óptimas de un plástico antes de realizar pruebas experimentales.

Código de simulación

GEOMETRIA

Geometria de muestra cilindrica de centellador

```
s:Ge/Muestra1/Type = "G4Tubs"  
s:Ge/Muestra1/Parent = "Group"  
s:Ge/Muestra1/Material = "Polystyrene"  
d:Ge/Muestra1/TransX = 0.0 cm  
d:Ge/Muestra1/TransY = 0.0 cm  
d:Ge/Muestra1/TransZ = 0.0 cm  
d:Ge/Muestra1/RotX = 0.0 deg  
d:Ge/Muestra1/RotY = 0.0 deg  
d:Ge/Muestra1/RotZ = 0.0 deg  
d:Ge/Muestra1/HL = 1.5 cm  
d:Ge/Muestra1/DPhi = 360 deg  
d:Ge/Muestra1/SPhi = 0.0 deg  
d:Ge/Muestra1/Rmin = 0.0 cm  
d:Ge/Muestra1/Rmax = 0.0 cm
```

FUENTE DE RADIACION

Fuente de radiacion

```
s:So/Default/Type = "Beam"  
s:So/Default/Component = "BeamPosition"  
s:So/Default/BeamParticle = "e-"  
d:So/Default/BeamEnergy = 6 MeV  
u:So/Default/BeamEnergySpread = 0.75  
s:So/Default/BeamShape = "Rectangle"  
d:So/Default/BeamHWX = 2 cm
```

CAPÍTULO 6 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN Y SIMULACIÓN DE LOS PLÁSTICOS CENTELLADORES.

```
d:So/Default/BeamHWY = 2 cm
d:So/Default/BeamAngularSpreadX = 0.0032 rad
d:So/Default/BeamAngularSpreadY = 0.0032 rad
d:So/Default/BeamXYDistribution = "Gaussian"
d:So/Default/BeamStandardDeviationX = 0.65 cm
d:So/Default/BeamStandardDeviationY = 0.65 cm
i:So/Default/NumberOfHistoriesInRun = 100000
```

POSICION DE FUENTE DE RADIACION

```
##### Posicion de fuente de radiacion #####
```

```
s: Ge/BeamPosition/Parent = "World"
s: Ge/BeamPosition/Type = "Group"
d: Ge/BeamPosition/TransX = 0 cm
d: Ge/BeamPosition/TransY = 0 cm
d: Ge/BeamPosition/TransZ = 101 cm
d: Ge/BeamPosition/RotX = 180 deg
d: Ge/BeamPosition/RotY = 0 deg
d: Ge/BeamPosition/RotZ = 0 deg
```

VISUALIZACION

```
##### Visualizacion #####
```

```
b:Gr/view/IncludeAxes = "True"
d:Gr/view/AxesComponent = "World"
d:Gr/view/AxesSize = 105
s:Gr/Visualizacion/Type = "OpenGL"
s:Ts/PauseForGeant4Commands = "BeforeQuit"
```

SCORER

```
##### Scorer cara frontal #####
s:Sc/Scorer/Quantity = "PhaseSpace"
s:Sc/Scorer/Surface = "Muestra1/ZPlusSurface"
s:Sc/Scorer/OutputType = "IAEA_ASCII"
s:Sc/Scorer/OutputFile = "DefaultPhotonSourceSurfaceOut"
b:Sc/Scorer/KillAfterPhaseSpace = "True"
s:Sc/Scorer/IncludeTime = "True"
s:Sc/Scorer/IfOutputFileAlreadyExist = "Overwrite"
```

**CAPÍTULO 6 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN Y
SIMULACIÓN DE LOS PLÁSTICOS CENTELLADORES.**

Bibliografía

- [1] W. R. Leo. Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments. 2a. Ed. Springer Verlag. Alemania.
- [2] Kwan Hoong Ng (20 22 October 2003). Non Ionizing Radiations Sources, Biological Effects, Emissions and Exposures.
- [3] Tapan K. Gupta. Radiation, Ionization, and Detection in Nuclear Medicine.
- [4] <https://issste20n.wordpress.com/radiobiologia>
- [5] Wundheiler Brian. Instrumentación en física en altas energías. Aplicación a Experimentos en Detección de Partículas. Escuela de Buenos Aires.
- [6] Synthesis of Titania-Silica Materials by Sol-Gel, Rubia F. S. Lenza, Wander L. Vasconcelos
- [7] <http://www.wolframalpha.com>
- [8] Martínez E. M.T., Moctezuma G.C., Métodos físico químicos en biotecnología. UNAM. Instituto de Biotecnología.
- [9] Modern Optical Methods of Analysis. Eugene D. Olsen. Ed. Reverté 1990.
- [10] J.R. Lakowicz, Principles of Fluorescence Spectroscopy, 2nd Ed., Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, London, Moscow, Dordrecht, 1999
- [11] Azorín N. J., Azorín V. C. 2010. Protección Radiológica. 1a Ed. Universidad Autónoma Metropolitana
- [12] Martínez A. C., Moreno T. J., Salas M. B., Espinosa G. G., Golarri y M. J. 2005. Protección Radiológica. Facultad de Ciencias de la UNAM.
- [13] Nanomarkets. Radiation Detection Materials Market. 2011. Nano 386.
- [14] Glenn F. Knoll. 2000. Radiation Detection and Measurement. 3a Ed. Estados Unidos.
- [15] http://www.depeca.uah.es/depeca/repositorio/asignaturas/32317/tema_5.pdf
- [16] <http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15.2.1.html>
- [17] Rickards C. Jorge, Cameras R. Ricardo, Las Radiaciones II. El manejo de las Radiaciones nucleares. <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/094/htm/radia2.htm>
- [18] <http://materias.df.uba.ar/labo5a2013v/files/2013/02/Centelladores.pdf>

BIBLIOGRAFÍA
BIBLIOGRAFÍA

- [19] Stefaan Tavernier. Experimental Techniques in Nuclear and Particle Physics. 2010. Springer.
- [20] http://labrad.fisica.edu.uy/docs/Detectores_de_Radiacion_Balseiro.pdf
- [21] <http://luzexperimental.weebly.com/untitled/category/all>
- [22] Manual de Usuario de Topas. <http://www.topasmc.org>
- [23] <https://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol19num1/articulos/luminiscentes/index.html>
- [24] <https://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/t/tissue-equivalent.html>
- [25] <http://www2.fisica.unlp.edu.ar/veiga/scintillators.html>