



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

"ESTUDIO DE LA RESPUESTA TL DEL TLD-300 MEDIANTE DIGITALIZACION DE CURVAS DE BRILLO"

291241

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
F I S I C O
P R E S E N T A :
CESAR OLVERA MORALES

DIRECTORA DE TESIS: M. EN C. ANA ELENA BUENFIL BURGOS



MEXICO, D. F.



FACULTAD DE CIENCIAS SECCION ESCOLAR



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

MAT. MARGARITA ELVIRA CHÁVEZ CANO
Jefa de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
Presente

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo de Tesis: "Estudio de la Respuesta TL del TLD-300 Mediante digitalización de curvas de brillo"

realizado por César Olvera Morales

con número de cuenta 8532060-6 , pasante de la carrera de Física

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis
Propietario

M. EN C. ANA ELENA BUENFIL BURGOS

Ana E. Buenfil Burgos

Propietario

DRA. OLGA LETICIA AVILA AGUIRRE

Olga Leticia Avila Aguirre

Propietario

FIS. ANDRES VALENTIN PORTA CONTRERAS

Andrés Valentín Porta Contreras

Suplente

M. EN C. PATRICIA RAQUEL AVILES MANDUJANO

Patricia Raquel Aviles Mandujano

Suplente

DR. ERNESTO BELMONT MORENO

Ernesto Belmont Moreno

Consejo Departamental de Física

Patricia Goldstein Menache
DRA. PATRICIA GOLDSTEIN MENACHE

FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Para mis padres:

*María de la Luz Morales Villanueva
Mardonio Olvera Olvera*

Muchas gracias por su apoyo y cariño

Agradecimientos.

Quiero agradecer a mis directores de tesis M. en C. Ana Elena Buenfil Burgos y Fis. César Ruiz Trejo por sus invaluable enseñanzas, apoyo y tiempo que me dedicaron amablemente.

Agradezco a los miembros del comité sinodal M. en C. Ana Elena Buenfil Burgos, Dra. Olga Leticia Ávila Aguirre, Fis. Andrés Valentín Porta Contreras, M. en C. Patricia Raquel Avilés Mandujano y Dr. Ernesto Belmont Moreno por la lectura, comentarios y modificaciones hechas a este trabajo de tesis.

Un agradecimiento especial a la Dra. María Ester Brandan Siqués por sus valiosas enseñanzas, comentarios y sugerencias desde que me incorporé al grupo de trabajo de dosimetría de la radiación del IF UNAM que ella tan atinadamente dirige.

A la Dra. Isabel Gamboa de Buen del ICN UNAM por haber realizado los programas en FORTRAN para la adecuación de los archivos de curvas de brillo, así como por sus comentarios.

Al Fis. Francisco Pena y Fis. Francisco Fernández del IF UNAM por su ayuda en el diseño, construcción y adecuación del circuito amplificador.

Al M. en C. Epifanio Cruz del ICN UNAM por el apoyo prestado en el uso del irradiador Gammacell.

A la Facultad de Ciencias de la UNAM por recibirme como alumno de la carrera de Física.

Al Instituto de Física de la UNAM por permitirme utilizar sus instalaciones.

A DGAPA UNAM por el apoyo brindado a través del proyecto IN101399 "Respuesta de materiales dosimétricos a la radiación densamente ionizante"

A DGSCA UNAM, y en especial a la Subdirectora de Redes Ing. Gabriela Medina.

A mis amigos Francisco Álvarez y Pablo De la O.

A Marina Leal Gaytán (te he dicho "se hizo de noche", y tú sabías que decía "te quiero")

¡Oh dicha de entender, mayor que la de imaginar o la de sentir!

Borges, La escritura del Dios

*Y, en efecto, es bueno que se sepa que lo poco que hasta aquí he
aprendido es casi nada, en comparación de lo que
ignoro y no desconfío de poder aprender.*

*Descartes, Discurso del Método,
sexta parte*

Indice.

1. Introducción.	1
2. Dosimetría de la radiación.	3
2.1 Dosis absorbida.	3
2.2 Kerma.	4
2.3 Equilibrio de partícula cargada.	5
2.4 Relación de Bragg-Gray.	6
2.5 Relación entre la dosis de dos medios distintos cuando existe EPC al ser expuestos a radiación indirectamente ionizante.	8
2.6 Termoluminiscencia.	9
2.7 Dosimetría termoluminiscente.	12
2.8 Dosímetros TL.	12
2.9 Antecedentes del TLD-300.	14
2.10 Equipos lectores.	15
2.11 Curvas de respuesta como función de la dosis.	16
2.12 Deconvolución.	16
2.13 Factor de supralinealidad.	17
3. Digitalización de curvas de brillo de un DTL.	19
3.1 Descripción del lector termoluminiscente Harshaw 2000.	20
3.1.1 El detector termoluminiscente Harshaw modelo 2000 A.	20
3.1.2 El amperímetro e integrador automático Harshaw modelo 2000 B.	21

3.2 Descripción de la tarjeta de adquisición de datos Lab-PC+.	22
3.2.1 Funciones y operación.	23
3.2.2 Configuración e instalación.	24
3.3 Descripción de amplificador.	26
3.4 Descripción del programa de adquisición de datos DAQWare.	27
3.5 Descripción del programa de deconvolución CGCD.	28
3.6 Generación, manejo y cambio de formato de archivos de datos.	29
3.6.1 Procedimiento para generar archivos de curvas de brillo.	29
3.6.2 Procedimiento para cambiar el formato de los archivos de curvas de brillo.	32
4. Verificación del sistema usando TLD-100 irradiado con rayos gamma.	35
4.1 Descripción del experimento.	35
4.2 Resultados.	37
4.3 Análisis.	40
4.4 Conclusiones.	41
5. Estudio del TLD-300 irradiado con rayos gamma usando el sistema compuesto por el lector Harshaw 2000 y la tarjeta Lab-PC+.	43
5.1 Descripción del experimento.	43
5.2 Resultados.	48
5.3 Análisis.	53
6. Conclusiones.	54
7. Bibliografía.	56

Apéndices.

A. Protocolo para la preparación, irradiación y lectura del TLD-100.	59
B. Protocolo para la preparación, irradiación y lectura del TLD-300.	60
C. Corrección del aumento en una constante en el valor de las lecturas de las curvas de brillo.	61
D. Glosario de términos de electrónica.	66

1. Introducción.

El dosímetro TLD-300 ($\text{CaF}_2:\text{Tm}$), presentado por Lucas y Kapsar en 1977 [Luc 77], es un material termoluminiscente que tiene una curva de brillo con dos picos principales que se refieren como pico 3 (150°C) y pico 5 (240°C).

Desde la introducción de este material se han hecho intentos de explotar sus propiedades para dosimetría en campos de radiación múltiples utilizando un solo tipo de dosímetro, por ejemplo, se ha usado para dosimetría clínica en campos mixtos de neutrones y rayos gamma, para discriminar entre radiación α y radiación β , etc. Además se ha utilizado para dosimetría de partículas pesadas, para estimación de la calidad e intensidad de radiación de fotones de baja energía, para dosimetría del pion y para determinar la energía desconocida de fuentes de radiación β usando la proporción entre el pico 3 y el pico 5. También se encontró que los picos 3 y 5 tienen buena estabilidad, lo que permite hacer medidas precisas de dosis teniendo flexibilidad en el tiempo que transcurre entre irradiación y lectura del dosímetro.

El grupo de Dosimetría de la Radiación del Instituto de Física de la UNAM estudia la respuesta del TLD-300 a radiación α , β , γ , protones e iones de ^{12}C [Bue 99]. Tales estudios se utilizarán para establecer la sensibilidad del dosímetro a partículas cargadas pesadas, dentro del proyecto **Respuesta de materiales termoluminiscentes a radiación densamente ionizante**. Como contribución a esos estudios, en este trabajo de tesis se mide el comportamiento del TLD-300 cuando se expone a radiación gamma.

Así, los dos objetivos principales de esta tesis son:

1. Acoplar un equipo lector termoluminiscente (TL), marca Harshaw modelo 2000, a una computadora PC, mediante el uso de una tarjeta de adquisición de datos. Lo que se busca es que a partir de las curvas de brillo provenientes del lector TL, después de digitalizarlas, se puedan generar archivos de datos con el formato adecuado para que se puedan analizar y realizar su deconvolución con un programa de cómputo. Para verificar el buen funcionamiento del sistema implantado se hace una comparación entre éste y un sistema TL comercial más moderno, el Harshaw 3500, que ya cuenta con la característica de proporcionar las curvas de brillo en forma digital. Para ello se usan dosímetros TLD-100 irradiados con rayos gamma de ^{60}Co , cuya curva de brillo está perfectamente caracterizada.
2. Utilizar el equipo lector modificado para estudiar la respuesta TL del cristal de $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ (TLD-300) a la radiación gamma de ^{60}Co . Tal respuesta en el intervalo de linealidad es útil como referencia para determinar la sensibilidad del dosímetro a otros tipos de radiación. Se aplican técnicas de deconvolución, usando curvas de Randall y Wilkins [Ran 45], para separar la curva de brillo en sus picos componentes, del 3 al 6. Las irradiaciones se llevan a cabo tanto en

el Instituto de Física de la UNAM (IF UNAM) como en el Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM (ICN UNAM). Las mediciones, el trabajo de electrónica y de computación se hacen en el IF UNAM.

El trabajo de tesis consta de seis capítulos. En el capítulo 1 se presentan la introducción y los objetivos de la tesis. En el capítulo 2 se revisan brevemente los conceptos básicos de la dosimetría de la radiación, tales como atenuación de la radiación, equilibrio de partícula cargada, dosis absorbida en un medio, teoría de cavidades, características fundamentales de los dosímetros, dosímetros termoluminiscentes y modelo de Randall y Wilkins. En el capítulo 3 se describen los componentes de equipos y programas que se unieron para implantar un sistema para la digitalización de curvas de brillo de dosímetros termoluminiscentes. En el capítulo 4 se explica como se realizó la verificación del sistema implantado por medio del estudio de dosímetros TLD-100 irradiados con rayos gamma. En los capítulos 5 y 6 se muestran el procedimiento, los resultados y las conclusiones del estudio de la respuesta del TLD-300 irradiado con rayos gamma de ^{60}Co .

2. Dosimetría de la radiación.

La dosimetría de la radiación se ocupa de la medición de la dosis absorbida (o de la tasa de dosis) en un material, que resulta de la interacción de la radiación ionizante con la materia [Los conceptos de este capítulo fueron tomados de la referencia Att 86, excepto donde se indique].

2.1 Dosis absorbida.

La energía radiante R se define como la energía de las partículas (excluyendo la energía en reposo) emitidas, transferidas, o recibidas [ICRU 80].

La energía impartida ε por la radiación ionizante a la materia, de volumen V y masa m , se define como:

$$\varepsilon = (R_{in})_u - (R_{out})_u + (R_{in})_c - (R_{out})_c - \Sigma Q \quad (2.1)$$

donde $(R_{in})_u$ es la energía radiante de partículas no cargadas que entran a V , $(R_{out})_u$ es la energía radiante de partículas no cargadas que salen de V , $(R_{in})_c$ es la energía radiante de partículas cargadas que entran a V , $(R_{out})_c$ es la energía radiante de partículas cargadas que salen de V y ΣQ es la energía neta obtenida a partir de la masa en reposo dentro de V (si la masa se transforma en energía, ΣQ es positiva y si la energía se transforma en masa, ΣQ es negativa).

La dosis absorbida D es relevante para todos los tipos de radiación ionizante, y se define en cualquier punto P en el volumen V como:

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm} \quad (2.2)$$

donde ε es ahora el valor esperado de la energía impartida en el volumen finito V durante un cierto intervalo de tiempo, $d\varepsilon$ es para un volumen infinitesimal dv en el punto P , y dm es la masa en dv . La unidad de la dosis en el Sistema Internacional (SI) de unidades es el gray (Gy); también es común expresarla en rad :

$$1Gy = 1 \frac{J}{Kg} = 10^2 rad \quad (2.3)$$

Se puede reconocer que D representa la energía por unidad de masa que permanece en la materia para producir cualquier efecto atribuible a la radiación, por lo que se considera la cantidad radiológica más importante.

La tasa de dosis en un punto P al tiempo t esta dada por:

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{d\varepsilon}{dm} \right) \quad (2.4)$$

2.2 Kerma.

La energía transferida ε_{tr} en un volumen V esta dada por la ecuación:

$$\varepsilon_{tr} = (R_{in})_u - (R_{out})_u^{nonr} + \sum Q \quad (2.5)$$

donde $(R_{in})_u$ y $\sum Q$ son las mismas que en la ecuación 2.1, y $(R_{out})_u^{nonr}$ es la energía radiante de partículas no cargadas que salen de V , exceptuando la que se origina de pérdidas radiativas en la energía cinética de las partículas cargadas que estén en V . Las pérdidas radiativas se refieren a la conversión de la energía cinética de las partículas cargadas por energía de fotones, a través de la producción de rayos X o de la aniquilación de positrones.

El kerma K se define en cualquier punto P en el volumen V como:

$$K = \frac{d\varepsilon_{tr}}{dm} \quad (2.6)$$

Así, el kerma es el valor esperado de la energía transferida a las partículas cargadas por unidad de masa en el punto de interés, incluyendo la energía de pérdidas radiativas, pero excluyendo la energía transferida de una partícula cargada a otra. La unidad del kerma en el SI de unidades es el gray (Gy); también es común expresarla en rad.

Para rayos X y gamma, el kerma consiste en la energía transferida a los electrones por unidad de masa del medio, y como la energía cinética de un electrón rápido se puede disipar en interacciones por colisión y radiativas, el kerma se puede subdividir en dos partes dependiendo si la energía se disipa en producir excitación e ionización (K_c) o en producir fotones de rayos X (K_r):

$$K = K_c + K_r \quad (2.7)$$

donde los subíndices se refieren al kerma de colisiones y al kerma radiativo respectivamente.

Para fotones monoenergéticos, el kerma de colisiones K_c está relacionado con la fluencia de energía Ψ a través del coeficiente de absorción de masa y energía $(\mu_{en} / \rho)_{E,Z}$, el cual es característico de la energía del fotón E y el número atómico Z de la materia en el punto P .

$$K_c = \Psi \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{E,Z} \tag{2.8}$$

donde el coeficiente de absorción μ_{en} está dado en m^{-1} , la densidad ρ en kg / m^3 y la fluencia de energía Ψ en J / m^2 .

2.3 Equilibrio de partícula cargada.

Existe equilibrio de partícula cargada (EPC), en un volumen V , si para cada partícula cargada de un tipo y energía dados que sale de ese volumen, existe otra idéntica que entra en él.

Para el caso de radiación indirectamente ionizante tenemos, como se muestra en la figura 2.1, un volumen V que contiene un volumen menor v . Las fronteras de V y v se requiere que estén separadas por al menos la máxima distancia de penetración de cualquier partícula cargada secundaria presente.

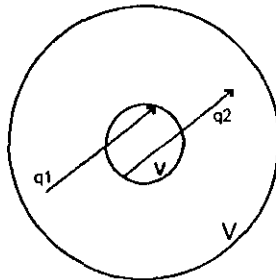


Figura 2.1 Equilibrio de partícula cargada (EPC). El volumen V contiene un medio homogéneo, uniformemente irradiado con radiación indirectamente ionizante. Se producen partículas cargadas secundarias uniformemente en el volumen V , no necesariamente de forma isotrópica, pero con la misma dirección y distribución de energía. Si la distancia mínima que separa las fronteras de V y del volumen interno v es más grande que el alcance de las partículas cargadas secundarias más energéticas, entonces existe equilibrio de partícula cargada en v .

Si las siguientes condiciones se satisfacen en el volumen V , entonces existe EPC en el volumen v .

1. La composición atómica del medio es homogénea.
2. La densidad del medio es homogénea.
3. Existe un campo uniforme de radiación indirectamente ionizante, es decir, la atenuación de los rayos es despreciable en su paso por el medio.
4. No existen campos eléctricos o magnéticos inhomogéneos.

Aun así, bajo ciertas condiciones geométricas es posible que exista equilibrio de partícula cargada en un volumen en el que no se satisfagan las condiciones mencionadas.

Una práctica común para conseguir el régimen de equilibrio de partícula cargada en un dosímetro durante la irradiación, consiste en recubrirlo con algún material cuyo espesor sea mayor o igual que el alcance de los electrones secundarios generados por la radiación primaria. El recubrimiento, que está colocado entre el haz de radiación y el dosímetro, genera los electrones secundarios que ingresan al dosímetro y compensan a los que salen de éste.

2.4 Relación de Bragg-Gray.

Si se tiene un haz de partículas cargadas idénticas, cuya fluencia es Φ (partículas/área) con energía cinética T , que pasa a través de una interfaz entre dos medios distintos, llamados w y g , tal como se muestra en la figura 2.2,

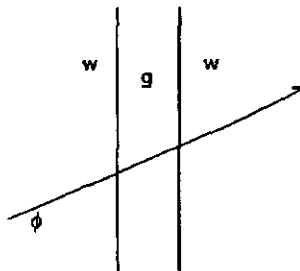


Figura 2.2 Esquema de un haz de partículas cargadas, de fluencia Φ y energía T , pasando a través de dos medios distintos, w y g .

entonces puede escribirse para D_w la dosis absorbida en el medio w de la interfaz:

$$D_w = \Phi \left[\left(\frac{dT}{\rho dx} \right)_{c,w} \right]_T \quad (2.9)$$

y para el medio g .

$$D_g = \Phi \left[\left(\frac{dT}{\rho dx} \right)_{c,g} \right]_T \quad (2.10)$$

en las ecuaciones anteriores, $[(dT/\rho dx)_{c,i}]_T$, es el poder de frenado de colisiones de las partículas secundarias de energía cinética T , en los medios w y g respectivamente.

Si se supone que Φ es continua a través de la interfaz, entonces puede escribirse la relación de Bragg-Gray:

$$\frac{D_w}{D_g} = \frac{\left(\frac{dT}{\rho dx} \right)_{c,w}}{\left(\frac{dT}{\rho dx} \right)_{c,g}} \quad (2.11)$$

El problema que intenta resolver la teoría de Bragg-Gray es la estimación de la dosis absorbida en un medio w al medir la dosis absorbida en un medio g , llamado de prueba, que se inserta en el primero. Al medio de prueba se le llama cavidad. Así, si se considera una región homogénea w en la cual se introduce una capa fina o cavidad, llena con un medio distinto g , como se muestra en la figura 2.2; y se hace pasar a través de ésta un haz de partículas o de rayos γ de fluencia Φ , entonces existen dos condiciones que deben cumplirse para continuar con el desarrollo:

1. El espesor de la capa g debe de ser suficientemente pequeño en comparación con el alcance de las partículas cargadas de máxima energía que llegan, de tal manera que la presencia de dicha cavidad no perturbe el campo de partículas cargadas.
2. La dosis absorbida en la cavidad se deposita en su totalidad por las partículas cargadas que la atraviesan.

Si consideramos un dosímetro (medio g) dentro de las paredes de un medio w , con las características necesarias para tener equilibrio de partícula cargada, entonces la relación de Bragg-Gray puede usarse para determinar la dosis D_w a partir

de la dosis D_g en el volumen sensible del dosímetro. La teoría de Bragg-Gray se aplica a cavidades pequeñas, comparadas con el alcance de los electrones secundarios. Para cavidades grandes se pueden aplicar otras herramientas, tales como la teoría de cavidades de Burlin, o la que utiliza el kerma de colisiones.

2.5 Relación entre la dosis de dos medios distintos cuando existe EPC al ser expuestos a radiación indirectamente ionizante.

Cuando existe EPC al irradiar un material g , se tiene que la dosis absorbida D es igual al kerma de colisiones K_c :

$$D_g \stackrel{EPC}{=} (K_c)_g \tag{2.12}$$

además se tiene la relación

$$(K_c)_g = \Psi_g \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_g \tag{2.13}$$

De manera análoga; para un material w

$$D_w \stackrel{EPC}{=} (K_c)_w \tag{2.14}$$

$$(K_c)_w = \Psi_w \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_w \tag{2.15}$$

Ahora, si se tiene como condición que la fluencia de energía en ambos medios es igual, $\Psi_g = \Psi_w$, entonces la relación entre la dosis absorbida de dos medios bajo EPC es:

$$\frac{D_g}{D_w} \stackrel{EPC}{=} \frac{(K_c)_g}{(K_c)_w} = \frac{\Psi_g \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_g}{\Psi_w \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_w} \tag{2.16}$$

que puede aplicarse para estimar la dosis en g a partir de la medida en w.

$$D_g^{EPC} = D_w \frac{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_g}{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_w}$$

(2.17)

2.6 Termoluminiscencia.

Un dosímetro termoluminiscente o DTL es un cristal que tiene activadores apropiados para que se produzca el fenómeno de termoluminiscencia. Los activadores, que se encuentran en pequeñas cantidades, forman dos tipos de centros o imperfecciones en la red cristalina: trampas para electrones y huecos, es decir, pozos de potencial eléctrico que capturan y retienen a los portadores de carga por ciertos periodos de tiempo, y centros luminiscentes que, estando localizados en las trampas, emiten luz cuando se recombinan con alguno de los portadores de carga. Estos centros están localizados en la banda de energías prohibidas del cristal.

Un modelo muy utilizado para explicar la termoluminiscencia, conocido como modelo de Randall y Wilkins [Ran 45], y que proviene de la teoría de bandas de estado sólido, indica que la radiación ionizante cede energía a un electrón, lo que le permite pasar de la banda de valencia del cristal a la banda de conducción, en donde se mueve hasta caer en una trampa para electrones, situada en la banda de niveles prohibidos de energía. Al mismo tiempo, el hueco producido por la vacancia se mueve en la banda de valencia hasta que se encuentra con una trampa para huecos. La energía potencial, que es la diferencia en energía entre la banda de conducción y la trampa para electrones, y entre la banda de valencia y la trampa para huecos, es decir, la profundidad de la trampa E, debe ser lo suficientemente grande para que ambos tipos de portadores de carga permanezcan atrapados por largos periodos de tiempo, hasta que se liberen por medios térmicos. Al suministrarle energía térmica suficiente al electrón, éste puede salirse de la trampa y llegar a la banda de conducción y eventualmente puede caer en un centro luminiscente, o en una trampa para huecos que se supone tiene acoplado uno muy cerca, y se recombina. La recombinación da como resultado la emisión de un fotón luminoso, que es la base de la termoluminiscencia.

El modelo de Randall y Wilkins ha tenido una gran vigencia a pesar de que han surgido otros posteriores, algunos de ellos muy recientes, que explican la termoluminiscencia desde una óptica diferente. La figura 2.3 es un diagrama de niveles que ilustra el proceso termoluminiscente según el modelo de bandas.

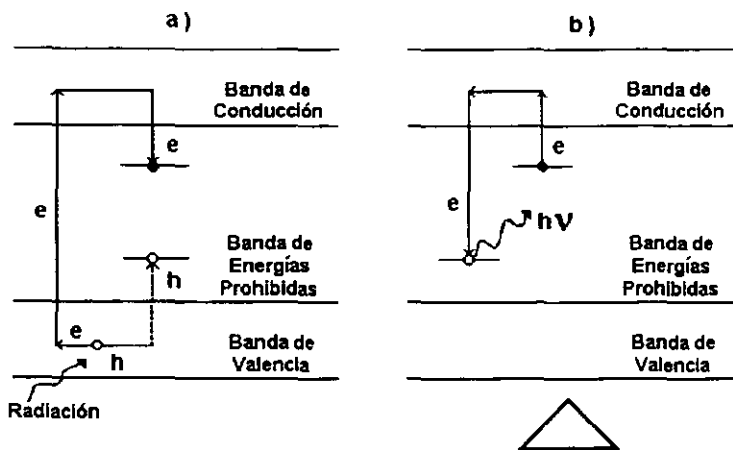


Figura 2.3 Esquema del proceso termoluminiscente según el modelo de bandas. a) Excitación de un electrón, que finalmente cae en una trampa en la banda de energías prohibidas. b) Recombinación de un electrón con un hueco, al calentar el cristal, lo que da como resultado la emisión de un fotón.

Según Randall y Wilkins, la probabilidad de escape por segundo p , para los electrones atrapados, está dada en términos de la temperatura absoluta T por medio de la ecuación:

$$p = \frac{1}{\tau} = \alpha e^{-\frac{E}{kT}} \quad (2.18)$$

donde τ es la vida promedio de la trampa, α es el factor de frecuencia, E es la energía de la trampa en eV y k es la constante de Boltzman ($k = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1} = 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}$).

De la expresión anterior se desprende que al aumentar la temperatura del cristal con el tiempo, empezando a la temperatura ambiente, habrá un incremento en la tasa de escape de los electrones atrapados, que será máxima a una temperatura T_m , disminuyendo gradualmente después al irse agotando el número de electrones atrapados. Suponiendo que al irse calentando el cristal, la intensidad de la luz emitida por este es proporcional al número de electrones que escapan, entonces a la temperatura T_m se tendrá un máximo o un pico de termoluminiscencia. A este pico se le llama pico de brillo. La existencia de trampas a diferentes profundidades da origen a muchos picos de brillo, que forman una curva de brillo, la cual es característica del material TL, y depende de la tasa de calentamiento, la dosis absorbida y el tipo de radiación a la que se expone el cristal.

El valor T_m se relaciona con la tasa de calentamiento lineal q ($^{\circ}\text{C/s}$) mediante la relación de Randall-Wilkins:

$$\frac{E}{kT_m^2} = \frac{\alpha}{q} e^{-\frac{E}{kT_m}} \quad (2.19)$$

Aunque no es obvio, T_m crece gradualmente cuando q crece. En la figura 2.4 se muestra una curva de brillo de un cristal TL en la que se ve la luz emitida con diferente intensidad conforme varía el número de electrones liberados de una trampa. Cuando se tiene un solo pico de brillo pasa lo siguiente: al iniciarse el calentamiento, la energía cedida al portador de carga es tan poca que la probabilidad de que éste escape de la trampa es prácticamente cero; al ir aumentando la temperatura la probabilidad de que el portador de carga escape aumenta, y cuando el cristal alcanza la temperatura máxima T_m asociada a la energía E o profundidad de la trampa, la probabilidad de escape es máxima. A temperaturas mayores que T_m la probabilidad de escape sigue siendo máxima pero el número de electrones liberados baja considerablemente, ya que la mayor parte de las trampas fueron vaciadas a la temperatura T_m . Los fotones emitidos están en la región del visible (460 nm para el pico 2 y 425 nm para el pico 6 en el TLD-100 [Mak 85]) y son la base de la señal TL.

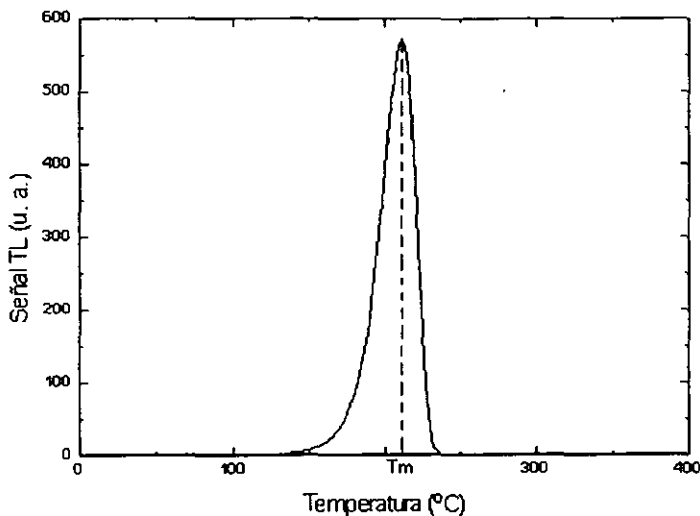


Figura 2.4 Curva de brillo de un solo pico de un cristal TL.

2.7 Dosimetría termoluminiscente.

La termoluminiscencia puede utilizarse para medir dosis absorbida en un medio irradiado con radiación ionizante. La señal TL puede amplificarse y transformarse de luz en un pulso eléctrico con un tubo fotomultiplicador, y se obtiene una curva de corriente contra temperatura o tiempo con la ayuda de una graficadora o computadora asociados al lector.

La integral de esta curva durante todo el tiempo de calentamiento es proporcional a la luz emitida por el cristal TL. El parámetro dosimétrico a medir (es decir, la respuesta del dosímetro) puede ser:

1. El área bajo la curva de brillo.
2. El área bajo uno o varios picos de la curva de brillo.
3. La altura de alguno de los picos de la curva de brillo.

Debido a que estas cantidades dependen del volumen del dosímetro, se utilizan debidamente normalizados por la masa del dosímetro. El volumen sensible de un dosímetro TL corresponde al que ocupa una masa de 1 a 100 mg de un material dieléctrico que contiene impurezas. Cuando los dosímetros se irradian con partículas cargadas, la energía puede depositarse en una cuantas micras de espesor del dosímetro, esto es, las partículas no atraviesan el dosímetro, por lo que hay que tener cuidado al evaluar el volumen sensible.

2.8 Dosímetros TL.

El medio para determinar la dosis es el dosímetro, el cual puede definirse como un dispositivo capaz de dar una lectura r como consecuencia de la energía depositada en él por la radiación, así r es una medida de la dosis absorbida D en el volumen sensible V del dosímetro. En general se espera que la respuesta r tenga una relación lineal con la dosis absorbida D , aunque esto no siempre ocurre o puede ocurrir únicamente para un intervalo de dosis determinado.

Entre las características deseables en un dosímetro se encuentran:

1. Ser absolutos: un dosímetro absoluto puede medir dosis absorbida en su volumen sensible de manera autónoma, es decir, no requiere ninguna comparación con un patrón. Existen tres tipos de dosímetros absolutos: calorímetro, cámara de ionización y solución de sulfato ferroso, Fricke. Los demás dosímetros en uso son no-absolutos o secundarios y requieren ser comparados o calibrados radiológicamente con uno absoluto para poder utilizarse.

2. Reproducibilidad en la respuesta: la reproducibilidad de la medida de un dosímetro tiene que ver con fluctuaciones estadísticas asociadas a las características del instrumental con el que se realiza la medición, condiciones ambientales, etc. y con la naturaleza estocástica de los campos de radiación. La reproducibilidad puede estimarse a partir de repetir una medida n veces y calcular su desviación normal respecto del promedio.
3. Conocimiento del intervalo de dosis: el intervalo de dosis en que puede usarse el dosímetro depende de tres características:
 - Sensibilidad a la dosis, definida como:

$$\text{Sensibilidad} = \frac{dr}{dD_g} \quad (2.20)$$

donde r es la respuesta del dosímetro a la radiación y D_g es la dosis promedio absorbida por el mismo. Resulta conveniente que la sensibilidad tenga un valor constante en todo el intervalo de dosis en el que se desea utilizar el dosímetro, lo que garantiza una respuesta lineal de éste con la dosis.

- Límite inferior útil: es el valor mínimo de dosis que un dosímetro puede leer confiablemente, y puede depender de la capacidad mínima del instrumental utilizado, de la radiación de fondo, y del límite de sensibilidad del dosímetro.
 - Límite superior útil: es el valor máximo de dosis que un dosímetro puede leer confiablemente, y tiene que ver con fenómenos de saturación o de daño en el dosímetro. Eventualmente el límite superior útil puede estar determinado por el equipo lector de que se dispone.
4. Independencia de la respuesta con la tasa de dosis: es conveniente que no haya dependencia de la respuesta de un dosímetro con la tasa de dosis en la que pueda usarse. En caso de existir, esta característica puede limitar su funcionamiento y su uso.
 5. Estabilidad: el comportamiento de los dosímetros debe ser estable antes, durante y después de la irradiación. Si esto no ocurre, hay que regresarlos a su estado inicial, o estimar los cambios ocurridos no ocasionados por la radiación
 6. Dependencia con la energía: la lectura r del dosímetro por unidad de dosis absorbida en el volumen sensible puede depender de la energía de la radiación o calidad del haz. Esta dependencia, asociada con la transferencia lineal de energía, es fundamental y representa la eficiencia en energía del

dosímetro, o sea su capacidad para dar la misma lectura para la misma cantidad de energía absorbida en su volumen sensible, independientemente del tipo o calidad de radiación que incida.

7. Geometría: la geometría del dosímetro debe ser parecida a la del volumen de interés del material cuya dosis se va a medir.

Existen diversos materiales TL que han sido ampliamente estudiados y utilizados como DTL, algunos son: LiF:Mg,Ti (TLD-100), $\text{CaF}_2\text{:Dy}$ (TLD-200), $\text{CaF}_2\text{:Tm}$ (TLD-300), $\text{CaF}_2\text{:Mn}$ (TLD-400), LiF-6 (TLD-600), LiF-7 (TLD-700), LiF:Mg,Cu,P (GR-207), KBr:Eu , KBr:Eu,Mg , diamantes, etc. Debido a sus características particulares, son útiles para fines específicos. Por ejemplo el TLD-600 se usa para medir dosis y fluencias de neutrones.

2.9 Antecedentes del TLD-300.

El $\text{CaF}_2\text{:Tm}$, conocido como TLD-300, es un material termoluminiscente que tiene una curva de brillo con dos picos principales, de acuerdo a la nomenclatura usual se refieren como pico 3 y pico 5 [Bos 91].

Desde la introducción de este material por Lucas y Kapsar [Luc 77] se han hecho intentos de explotar sus propiedades para dosimetría en campos de radiación múltiples usando un solo tipo de dosímetro. Temme et al [Tem 81] usaron el TLD-300 para dosimetría clínica en un campo mixto de neutrones y rayos γ . Shachar y Horowitz [Sha 88] encontraron que el TLD-300 es superior al TLD-700 para la dosimetría $n\text{-}\gamma$, usando la relación entre picos 3 y 5. Hoffmann et al [Hof 80a, 84], así como Loncol et al. [Lon 96] lo usaron para dosimetría de partículas pesadas. Además Hoffmann et al. [Hof 80b] encontraron que entre varios materiales termoluminiscentes el TLD-300 era el más adecuado para dosimetría del Pion. El material ha sido usado también para estimación de la calidad e intensidad de radiación de fotones de baja energía [Lak 82]. La proporción entre el pico 3 y el pico 5 fue usada por Furetta y Tuyn [Fur 85] para determinar la energía desconocida de fuentes de radiación β . Lakshmanan [Lak 83] y Wang et al. [Wan 89] usaron el TLD-300 para discriminar entre radiación α y radiación β . Furetta [Fur 83] encontró que los picos 3 y 5 del material tienen buena estabilidad, lo que permite hacer medidas precisas de dosis teniendo flexibilidad en el tiempo que transcurra entre irradiación y lectura del dosímetro. Así, y debido a la importancia de este material para dosimetría es necesario realizar más trabajo experimental para conocer mejor sus propiedades dosimétricas.

El grupo de Dosimetría de la Radiación del IF UNAM estudia la respuesta del TLD-300 a radiación α , β , γ , protones e iones de ^{12}C [Bue 99], y en este trabajo de tesis se reporta su comportamiento cuando se expone a la radiación γ .

2.10 Equipos lectores.

El equipo lector permite obtener con relativa facilidad el valor de cualquiera de los parámetros mencionados en la sección 2.7. Este equipo consiste, en general, en una fuente controlada de calentamiento, un tubo fotomultiplicador y un equipo electrónico asociado para integrar en el tiempo la señal eléctrica que sale del tubo fotomultiplicador. La figura 2.5 es un diagrama a bloques que representa los principales componentes del equipo lector.

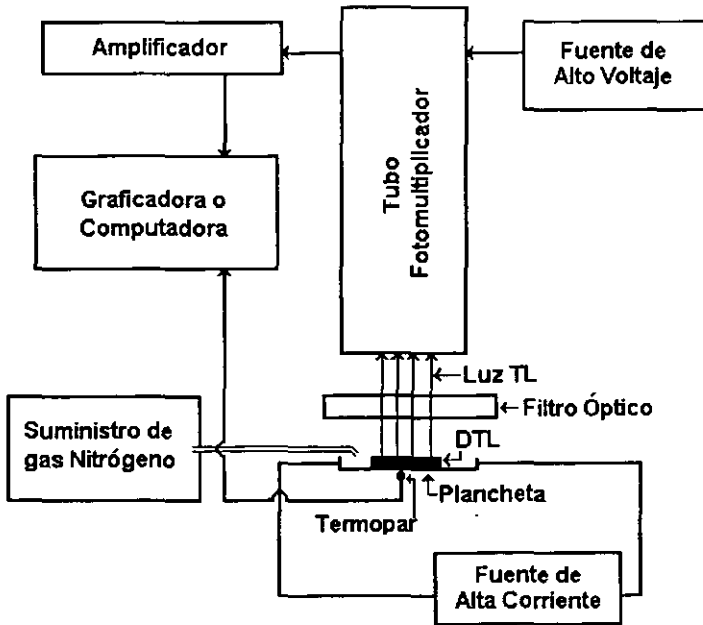


Figura 2.5 Diagrama a bloques de los principales componentes de un equipo lector termoluminiscente.

Para obtener la lectura de la señal TL se coloca el dosímetro en una plancheta metálica por la que se hace pasar una corriente eléctrica para calentarla. El dosímetro se calienta por contacto y emite luz que llega al tubo fotomultiplicador, el cual convierte la señal luminosa en eléctrica y la amplifica. Esta corriente eléctrica se integra durante el tiempo total de lectura, de manera que se obtiene un valor de carga eléctrica que es proporcional a la intensidad total de la luz emitida por el dosímetro. La carga eléctrica es igual a la integral de la corriente, es decir, igual al área bajo la curva de brillo.

Cuando se leen los cristales es necesario suministrar gas nitrógeno N_2 al módulo en donde se encuentra la plancheta, ya que ésta y los DTL se calientan a altas temperaturas, por lo que pueden reaccionar con los elementos del aire y contaminarse.

2.11 Curvas de respuesta como función de la dosis.

Debido a que los dosímetros TL no son absolutos o primarios, deben calibrarse respecto de un campo de radiación calibrado a su vez por un laboratorio autorizado. Esta calibración consiste en exponer los dosímetros a un campo de radiación conocido, y obtener una curva de referencia o calibración que se puede utilizar para interpretar las respuestas de los dosímetros cuando se expongan a un campo de radiación no conocido.

Conviene que la calibración se lleve a cabo en un intervalo de dosis en el que la respuesta del DTL como función de la dosis sea lineal. Para algunos de los DTL más comúnmente usados (TLD-100, TLD-300, etc.) el intervalo de respuesta lineal se extiende más allá de 1 Gy; para dosis más altas, puede aparecer el comportamiento llamado supralineal. También podría establecerse una relación entre la dosis y la respuesta no lineal, pero la incertidumbre en la interpretación de la dosis puede ser muy alta.

Las curvas de respuesta como función de la dosis son una herramienta útil para estimar dosis en un campo de radiación desconocido, y el valor de su pendiente se usa como referencia cuando se quiere determinar la sensibilidad de los dosímetros a otros tipos de radiación.

2.12 Deconvolución.

La deconvolución de una curva de brillo es el proceso analítico de separarla en sus picos componentes usando algoritmos cinéticos de primer orden [CGC 88]. La deconvolución hace que esos picos puedan ser mostrados individualmente, analizados, y sus áreas cuantificadas, por lo que los patrones de dosis absorbida pueden ser identificados. Como medida de la precisión de la deconvolución tenemos la de sumar las áreas bajo los picos y compararla con el área bajo la curva original, además de reconstruir con estos picos la curva original. Si se logra con una diferencia del 2% se considera más que adecuado para la mayoría de las aplicaciones.

Se muestra en la figura 2.6 una curva de brillo típica del dosímetro TLD-100 junto con los picos que la componen obtenidos con deconvolución.

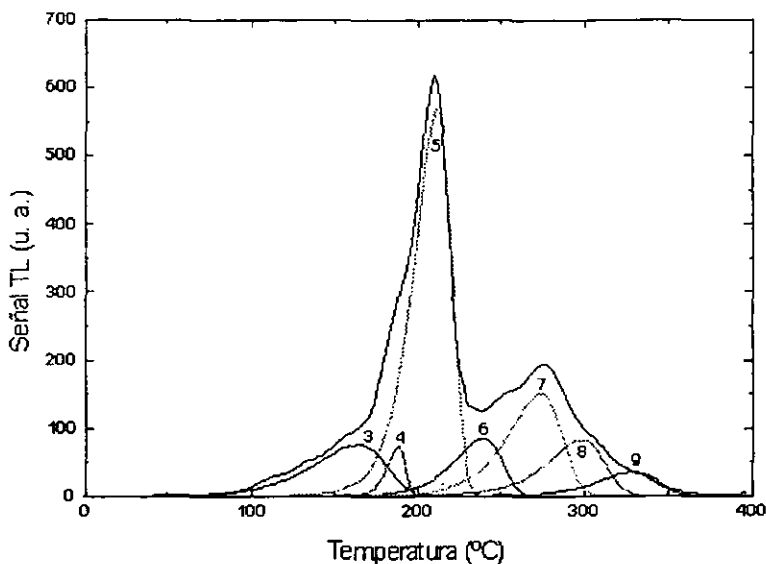


Figura 2.6 Curva de brillo típica del TLD-100, junto con los picos 3 al 9 que la componen obtenidos con deconvolución.

Los valores importantes de los picos individuales que se pueden conocer a través de la deconvolución son: área bajo la curva o integral, altura o valor máximo, y posición en el eje X del valor máximo; este último valor se puede relacionar con una temperatura (como en la figura 2.6), o con un canal de lectura (como en los equipos multicanal).

2.13 Factor de supralinealidad.

Para determinar de manera más precisa el comportamiento de la respuesta TL a la dosis absorbida, se utiliza la función de respuesta $f(D)$, o factor de supralinealidad, definida por [Hor 84]:

$$f(D) = \frac{\frac{dF(D)}{dD}}{\frac{dF(D_1)}{dD_1}} \quad (2.21)$$

donde $F(D)$ es la señal TL obtenida a una dosis D y $F(D_1)$ es la señal TL obtenida a una dosis baja D_1 para la cual $F(D)$ es lineal. El valor de $f(D)$ es la pendiente de la curva de dosis respuesta TL a una dosis D normalizada por la pendiente de la curva a una dosis D_1 .

Además consideremos:

$$f'(D) = \frac{\frac{d^2 F(D)}{dD^2}}{\frac{d^2 F(D_1)}{dD_1^2}} \quad (2.22)$$

Entonces, si $f(D) = 1$	la respuesta es lineal.
$f(D) > 1$ o $f'(D) > 0$	la respuesta es supralineal.
$f(D) < 1$ o $f'(D) < 0$	la respuesta es sublineal.

3. Digitalización de curvas de brillo de un DTL.

En el Laboratorio de Dosimetría de la Radiación del Departamento de Física Experimental del Instituto de Física de la UNAM, existen dos equipos lectores termoluminiscentes marca Harshaw modelo 2000. Durante varios años se ha trabajado con estos equipos, los que permiten obtener el área integrada bajo la curva de brillo y con ayuda de una graficadora, la curva de brillo correspondiente. El obtener información dosimétrica de la curva de brillo así obtenida es extremadamente difícil y tedioso, además de que no se puede realizar la deconvolución de ésta.

A la luz de los avances en materia de computación y de adquisición de datos se decidió asociar a uno de estos lectores TL, una computadora PC con una tarjeta de adquisición de datos y los programas de cómputo correspondientes.

El sistema así implantado permite realizar el manejo de los datos TL en forma más fácil, su conservación en archivos y su posterior análisis, además de permitir la deconvolución de la curva de brillo, esto último, esencial para el análisis de la misma. En la figura 3.1 tenemos el dibujo de dicho sistema.

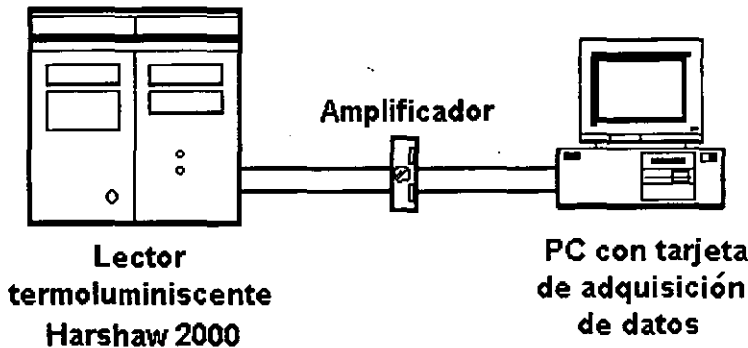


Figura 3.1 Dibujo esquemático del sistema implantado con un lector TL Harshaw 2000, un amplificador de voltaje para acoplar las señales, una computadora PC con una tarjeta de adquisición de datos y los programas de cómputo correspondientes.

A continuación se revisan las principales características y especificaciones de los componentes del sistema implantado.

3.1 Descripción del lector termoluminiscente Harshaw 2000.

El lector termoluminiscente Harshaw 2000 consta de dos módulos: el Harshaw modelo 2000 A y el Harshaw modelo 2000 B. La principal función del lector Harshaw 2000 A es calentar el material termoluminiscente y detectar la luz emitida por éste; un tubo fotomultiplicador convierte la luz en una señal de corriente eléctrica. Dicha corriente se amplifica, integra y muestra en el Harshaw 2000 B.

El lector TL Harshaw 2000 provee además de la señal proporcional a la luz emitida por el material TL (señal TL), una señal de la temperatura a la que se calentó el material TL; estas dos señales son las que se digitalizan para obtener información de la curva de brillo del material TL en estudio.

Ahora se procede a describir las principales características de los dos módulos del lector Harshaw 2000; para información más detallada consulte el manual del equipo [H2K].

3.1.1 El detector termoluminiscente Harshaw modelo 2000 A.

El detector termoluminiscente modelo 2000 A, es un sistema capaz de leer dosímetros TL en forma de sólido o polvo. La función básica de esta unidad es calentar el DTL colocado en una plancheta metálica, aumentando la temperatura a una tasa constante, controlada y reproducible; y detectar la luz emitida por el DTL por medio de un tubo fotomultiplicador de alta ganancia y bajo ruido, que convierte la luz en una corriente eléctrica. Además de esta señal de salida del tubo fotomultiplicador, que se envía al modelo 2000 B, la unidad entrega una señal de salida de la temperatura de la plancheta.

El calentamiento de la plancheta es lineal y regulado con la ayuda de un termopar. La plancheta está aislada térmicamente del tubo fotomultiplicador para evitar lecturas erróneas de los DTL. Además, en el equipo se puede lograr una excelente sensibilidad a bajas dosis suministrando nitrógeno a la cámara de la plancheta. Durante la lectura la plancheta y los DTL se calientan a altas temperaturas y el nitrógeno evita que reaccionen con los elementos del aire.

La figura 3.2 muestra un diagrama a bloques del detector termoluminiscente Harshaw modelo 2000 A.

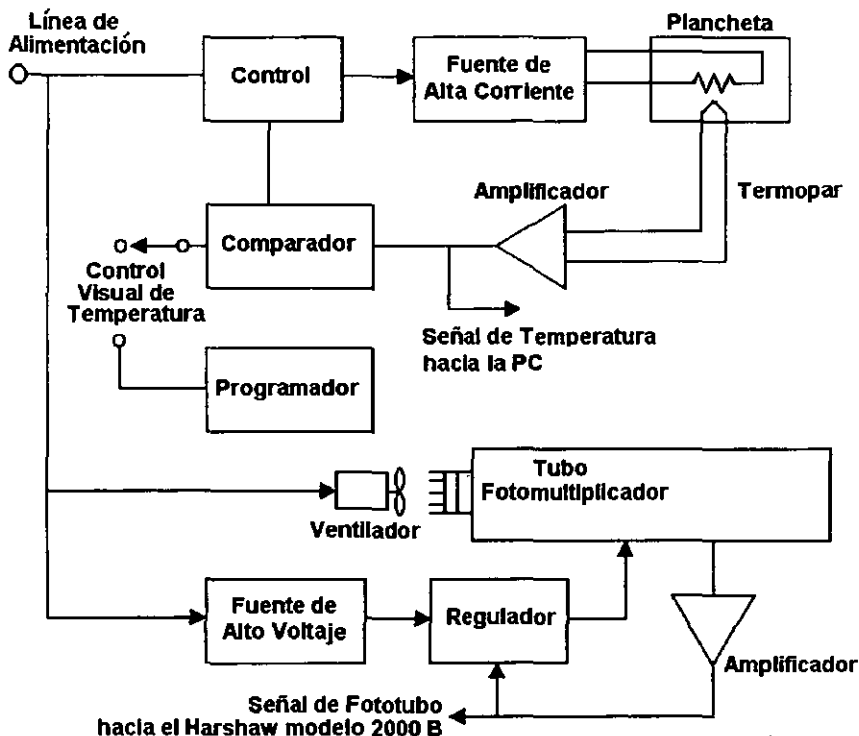


Figura 3.2 Diagrama a bloques del detector termoluminiscente Harshaw modelo 2000 A.

3.1.2 El amperímetro e integrador automático Harshaw modelo 2000 B.

El amperímetro e integrador automático modelo 2000 B integra la pequeña señal de corriente eléctrica proveniente del tubo fotomultiplicador del detector 2000 A, exhibiendo en una pantalla un valor de carga eléctrica, equivalente al área bajo la curva de brillo del DTL calentado en el detector 2000 A. El periodo de integración se puede seleccionar de 1 a 99 segundos con incrementos de 1 segundo. El Harshaw 2000 B entrega una señal eléctrica de 0 a 100 mV en su salida lineal, proporcional a la luz emitida por el DTL (señal TL); esta señal se puede vigilar, para conocer sus cambios, durante la lectura del DTL usando el electrómetro con el que cuenta esta misma unidad. Tal señal es la que se digitaliza junto con la de temperatura para obtener información de la curva de brillo del DTL que se estudie.

La figura 3.3 muestra un diagrama a bloques del amperímetro e integrador automático Harshaw modelo 2000 B.

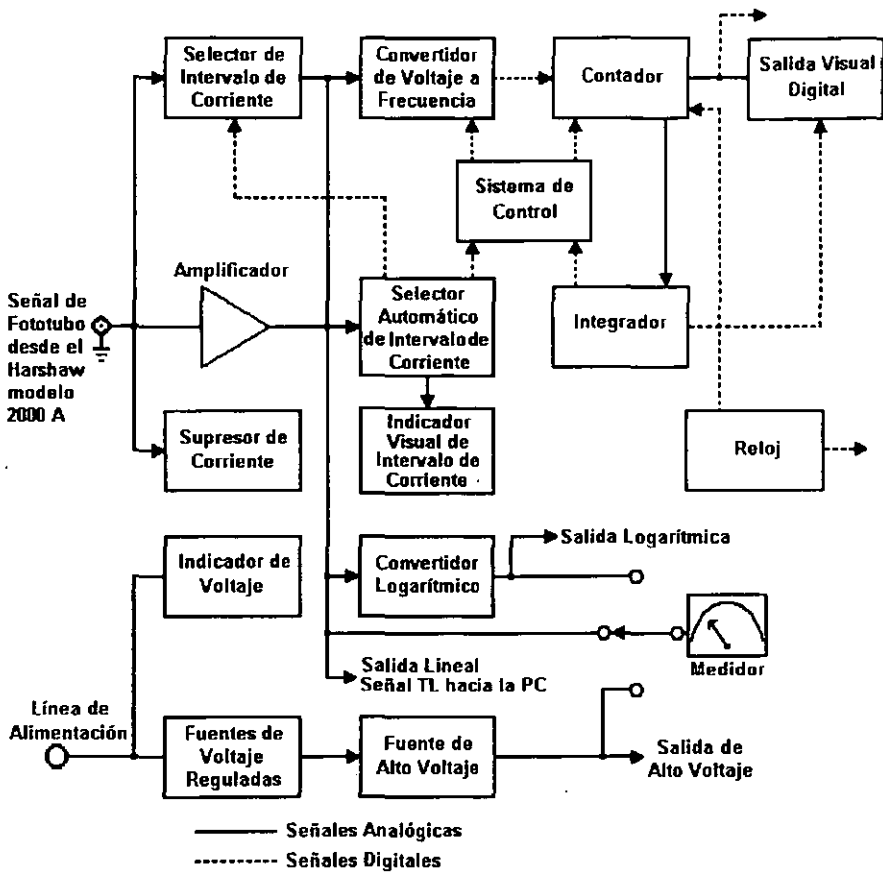


Figura 3.3 Diagrama a bloques del amperímetro e integrador automático Harshaw modelo 2000 B.

3.2 Descripción de la tarjeta de adquisición de datos Lab-PC+.

La Lab-PC+ es una tarjeta que tiene funciones de conversión analógico-digital, de conversión digital-analógico y de temporización, con la capacidad de configurarse según la aplicación que se le vaya a destinar. La Lab-PC+ instalada en una Computadora Personal (PC), es una versátil plataforma para pruebas, medidas y control.

3.2.1 Funciones y operación.

Las principales funciones y circuitos componentes de la tarjeta son:

1. De interfaz con los puertos de Entrada/Salida (In/Out) de la PC.
2. De entrada analógica y de adquisición de datos.
3. De salida analógica.
4. De entrada y salida digital.
5. De entrada y salida de temporización.

La única función que se utiliza en esta tesis, es la que se realiza con los circuitos de entrada analógica y adquisición de datos, por lo que la teoría de la operación de tal función se explica a continuación, pudiendo consultar el manual [LPC 93] para mayor información. Así mismo puede consultarse el apéndice D, que contiene un glosario de términos de electrónica.

Los circuitos de entrada analógica y de adquisición de datos de la tarjeta incluyen dos multiplexores de entrada analógica (1), un amplificador de ganancia programable por software (2), un convertidor analógico-digital (AD) de 12 bits (3) y una memoria FIFO (First In - First Out) de 12 bits con extensión de signo a 16 bits (4). Véase figura 3.4.

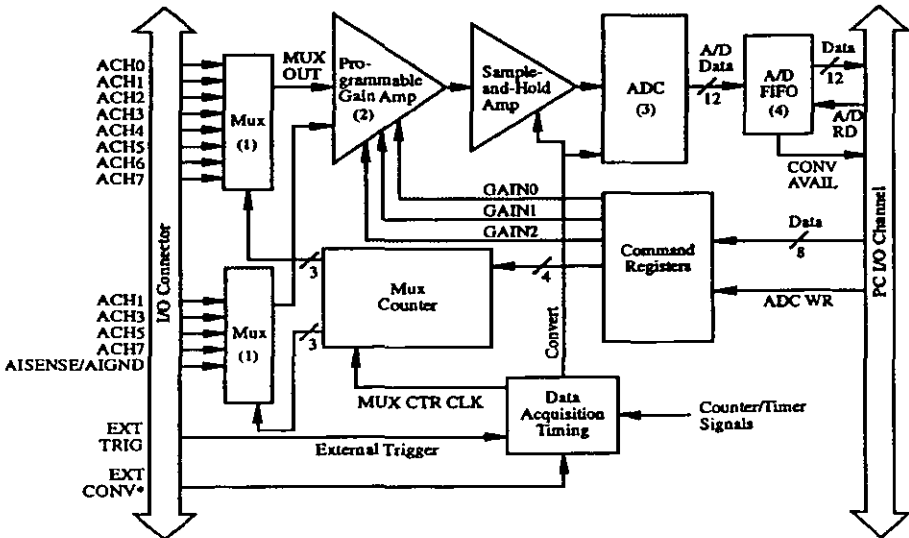


Figura 3.4 Diagrama a bloques de los circuitos de entrada analógica y adquisición de datos de la tarjeta Lab-PC+.

Uno de los multiplexores (1) tiene ocho canales de entrada analógica (Canal ACH0 a Canal ACH7), donde las entradas 0 y 1 se utilizan para digitalizar las señales de Temperatura y Señal TL del lector Harshaw 2000 respectivamente. El otro multiplexor (1) está conectado a los canales 1, 3, 5 y 7 del modo diferencial, los cuales no se utilizan en esta tesis. La entrada de los multiplexores cuenta con una protección contra sobrevoltajes de ± 45 V.

El amplificador de ganancia programable (2) amplifica la señal de entrada antes de que ésta se lea y convierta, con esto se incrementa la resolución y precisión de las medidas. La ganancia del amplificador se selecciona por software, pudiendo escoger entre 1, 2, 5, 10, 20, 50 y 100.

La tarjeta Lab-PC+ usa un convertidor AD de 12 bits (3) de aproximaciones sucesivas. Los 12 bits de resolución del convertidor permiten resolver las señales de entrada en 4096 niveles diferentes, con lo que se proporciona una lectura digital de 12 bits que representa el valor del voltaje de la señal de entrada. El convertidor AD sólo tiene un intervalo de entrada de 0 a + 5 V. Circuitos adicionales le permiten manejar entradas de ± 5 V y de 0 a + 10 V.

Cuando se completa la conversión AD, el resultado se coloca en la memoria FIFO-AD (4). Esta área de almacenamiento tiene 16 bits por 512 palabras. La FIFO sirve como almacén de información al convertidor AD y provee dos beneficios. Primero, cuando se completa una conversión AD, el valor se guarda en la FIFO-AD para leerse después, y el convertidor AD queda libre para iniciar otra conversión. Segundo, la FIFO-AD puede almacenar 512 valores de conversiones AD antes de que se pierda cualquier información. La memoria FIFO-AD genera una señal que indica cuando contiene datos de conversiones AD, los cuales se leen posteriormente a través del canal de Entrada/Salida (I/O) de la computadora.

3.2.2 Configuración e instalación.

La tarjeta tiene un microinterruptor de 5 polos, y seis "jumpers" para configurar las entradas y salidas analógicas, y la interfaz con el bus de la PC. El microinterruptor sirve para asignar la dirección base del canal de Entrada/Salida. Se usan los "jumpers" W5 y W6 para seleccionar el nivel de interrupción y el canal de DMA (Direct Access Memory) respectivamente. Los "jumpers" W3 y W4 configuran los circuitos de entrada analógica, y los "jumpers" W1 y W2 configuran los circuitos de salida analógica.

La configuración de la tarjeta, con la que se trabajó para realizar la toma de datos se muestra en la tabla 3.1 con el símbolo \checkmark . Tal configuración es la de fábrica, excepto para el parámetro de "Intervalo de entrada", el cual viene Bipolar de fábrica y se cambió el "jumper" W3 para dejarlo como Unipolar, siendo éste el más conveniente para realizar la toma de datos.

Parámetro	microinterruptor o "jumper"	Configuración
Dirección base de Entrada/Salida	microinterruptor	Hexadecimal 260 √
Interrupción	"jumper" W5	5 √
Canal de DMA	"jumper" W6	3 √
Intervalo de entrada	"jumper" W3: A-B "jumper" W3: B-C	Bipolar: $\pm 5V$ Unipolar: 0 a 10V √
Modo de entrada	"jumper" W4: A-B "jumper" W4: B-C "jumper" W4: B-C	Referenced single ended (RSE) √ Nonreferenced single ended (NRSE) Differential
Polaridad de salida CH0	"jumper" W1: A-B "jumper" W1: B-C	Bipolar: $\pm 5V$ √ Unipolar: 0 a 10V
Polaridad de salida CH1	"jumper" W2: A-B "jumper" W2: B-C	Bipolar: $\pm 5V$ √ Unipolar: 0 a 10V

Tabla 3.1 Configuración usada en la tarjeta Lab-PC+ para realizar la toma de datos, marcada con √. Es la configuración de fábrica, excepto para el parámetro de "Intervalo de entrada", cambiado de Bipolar a Unipolar.

La Lab-PC+ se puede instalar en cualquier puerto de expansión de 8 o 16 bits disponible en la PC. Después de haber cambiado, verificado y anotado las posiciones de los interruptores y "jumpers" se está listo para la realizar la instalación de la tarjeta.

A continuación se indican de manera general los pasos requeridos para la instalación de la tarjeta:

1. Apagar la computadora.
2. Quitar la cubierta superior para acceder a los puertos de Entrada/Salida.
3. Quitar la cubierta de protección del puerto de expansión que ese encuentra en el panel posterior de la computadora.
4. Insertar la tarjeta en un puerto de 8 o 16 bits.
5. Atornillar el soporte de montaje de la tarjeta al soporte de la computadora.
6. Colocar la cubierta superior.

Así la tarjeta queda configurada, instalada y lista para usarse.

3.3 Descripción del amplificador.

Se analizaron las señales de salida del equipo lector TL Harshaw 2000, Señal TL y Temperatura, observándose que son señales analógicas con voltajes de salida de 0 a 100 mV. Por otro lado, la tarjeta Lab-PC+ acepta voltajes de 0 a 100 mV cuando la ganancia se programa en 100 (máxima ganancia). Así que cuando el equipo TL da señales de pocos mV, la curva de brillo obtenida no tiene mucha altura en la pantalla de la computadora y no se pueden apreciar detalles. Entonces se construyó un amplificador para adecuar los valores de los voltajes a aquellos que maneja la tarjeta con una ganancia menor, de tal manera que la imagen de la curva de brillo obtenida en la computadora se mejora.

El amplificador construido consta de dos circuitos iguales, uno para la Señal TL y otro para la Temperatura, basados en amplificadores operacionales conectados como inversores y con entradas de alta resistencia (millones de ohms) para no producir efectos sobre los componentes externos. El circuito integrado usado es el TL084. Con un par de perillas se puede variar la ganancia, teniendo 5 pasos de amplificación, llamados TLO (x1), TL1 (x2.5), TL2 (x5), TL3 (x7.5), TL4 (x10) para el amplificador que maneja la Señal TL; y TO (x1), T1 (x2.5), T2 (x5), T3 (x7.5), T4 (x10) para el amplificador que maneja la Temperatura.

En la figura 3.5 se muestra el diagrama eléctrico usado para la Señal TL.

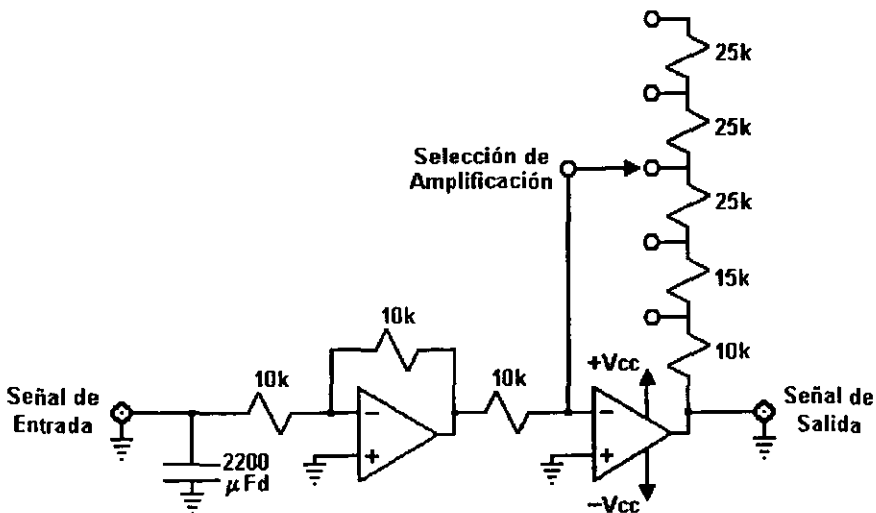


Figura 3.5 Diagrama eléctrico del amplificador. Se utilizan dos amplificadores iguales, uno para la Señal TL y otro para la Temperatura.

3.4 Descripción del programa de adquisición de datos DAQWare.

DAQWare es un paquete de software que sirve para configurar, verificar y controlar la tarjeta de adquisición de datos Lab-PC+. Por medio de un sistema de menú se pueden operar las funciones analógicas, digitales y de temporización de la tarjeta. La versión DAQWare v.1.6 cuenta con:

1. Panel de Configuración para seleccionar entre varias configuraciones de las entradas y salidas analógicas.
2. Utilidades de prueba para las entradas y salidas analógicas, entradas y salidas digitales, y los temporizadores, las cuales sirven para asegurar que el hardware de adquisición de datos trabaja adecuadamente.
3. Panel de instrumentos para grabar voltajes, generar ondas, y medir temperaturas. Los instrumentos son Strip Chart Recorder & Data Logger, Generador de Funciones y Medidor de Temperatura.

El manual de DAQWare [NDM 93] tiene la información más detallada de sus características y usos. DAQWare fue escrito usando el programa de adquisición de datos LabWindows y librerías de interfaz de usuario, el código fuente de DAQWare se encuentra disponible para poder adaptarlo a las aplicaciones del usuario.

Para realizar las medidas necesarias para este trabajo:

1. Se configuran las entradas analógicas de la Lab-PC+, usando tanto el "jumper" W3 del "Intervalo de entrada" (véase sección 3.2.2), como el Panel de Configuración de DAQWare (véase sección 3.6.1, puntos 2 y 3).
2. Se usa el instrumento de DAQWare: Strip Chart Recorder & Data Logger, el cual permite dar varios parámetros para el funcionamiento de las entradas analógicas y la adquisición de datos, así como guardar en disco duro los archivos con los datos obtenidos (véase sección 3.6.1, puntos 4 a 9).

Así, usando este software y todos los componentes descritos del sistema implantado se está listo para la adquisición de curvas de brillo, su conservación en archivos y su posterior análisis; además de permitir la deconvolución de la misma con el software adecuado.

3.5 Descripción del programa de deconvolución CGCD.

El software Computerized Glow Curve Deconvolution -CGCD- es un programa diseñado por Harshaw/Filtrol para hacer la deconvolución de las curvas de brillo usadas en la dosimetría termoluminiscente.

El proceso básico que realiza el CGCD es separar la curva de brillo en sus picos individuales. Esto se lleva a cabo en tres pasos:

1. Sustracción del fondo. En este paso se calcula y sustrae la porción de la curva de brillo debida al "ruido" y a la radiación infrarroja.
2. Sustracción del pico 2. En este paso se sustrae de la curva el pico 2 de baja temperatura, antes que sean separados los otros picos. El pico 2 puede sustraerse individualmente porque usualmente no es sustancial su traslape con los otros picos. Sin embargo no siempre es necesario sustraer este pico individualmente y puede separarse junto con los otros picos si se desea.
3. Separación de los picos. En un solo proceso se realiza la separación de los picos restantes. Se dispone de dos formas distintas para procesar los picos: la primera es la cinética de primer orden usando curvas de acuerdo al modelo de Randall y Wilkins, la segunda es la técnica que utiliza curvas gaussianas.

Para que pueda ser procesada por el CGCD, la información de la curva de brillo debe estar en un archivo de datos, escrito en ASCII con el siguiente formato: N es el número total de pares de datos del archivo, X es la columna de Canal, Y es la columna de Señal TL, según se muestra en la figura 3.6.

N	
X ₁	Y ₁
X ₂	Y ₂
X ₃	Y ₃
X ₄	Y ₄
•	•
•	•
•	•
X _N	Y _N

Figura 3.6 Formato del archivo de datos con información de la curva de brillo que el programa CGCD necesita para realizar la deconvolución.

3.6 Generación, manejo y cambio de formato de los archivos de datos.

A continuación se explica el procedimiento para generar curvas de brillo de dosímetros TL, usando el sistema implantado, así como los pasos necesarios para poder realizar la deconvolución de las mismas.

3.6.1 Procedimiento para generar archivos de curvas de brillo.

1. Para iniciar el programa DAQWare, escribir en el prompt `C:\> 2000 .\`
2. Seleccionar del Menú principal: **Configure** → **Analog input**.
3. Revisar que se esté en el modo de **Ref. Single-Ended**, colocar **Input polarity** en **Unipolar**, para salir marcar **OK**.
4. Seleccionar del Menú principal: Instruments → **Strip Chart & Data Logger**. (Véase en la figura 3.7 la pantalla principal de este instrumento).

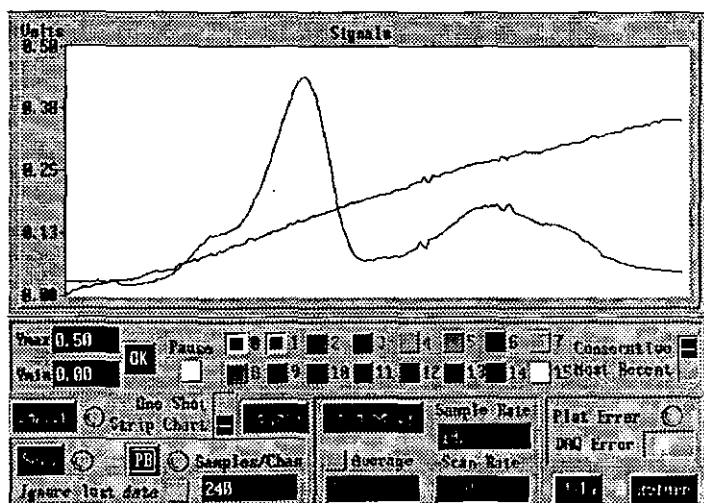


Figura 3.7 Pantalla principal del instrumento Strip Chart & Data Logger del software de adquisición de datos DAQWare. La imagen muestra una curva de brillo y su rampa de aumento de temperatura. (La curva de brillo corresponde a un dosímetro TLD-300 irradiado a 5 Gy de rayos γ y de ^{60}Co ; leído a 350°C , carga total = 682 000 nC, escala de lectura en el Harshaw 2000 = 10^{-6} A, valor máximo en el electrómetro del Harshaw 2000 ≈ 85 , pasos del amplificador $T=2$ y $TL=2$).

5. Escribir en **$Y_{max} = 0.5 V$** ; es MUY importante marcar **OK**.
6. Seleccionar **Chan Setup**; escribir los siguientes valores en:

Numbers of Channels: 2,
Gain: 20,
Channel 0: Temperatura (esto es una etiqueta),
Channel 1: Señal TL (esto es una etiqueta),

para salir marcar **OK**.

7. Escribir en **Sample rate: 10**.
8. Encender el amplificador, colocar la amplificación de la Señal TL en el paso adecuado, colocar la amplificación de la Temperatura en el paso adecuado.

NOTA: Para la selección de los pasos de la amplificación se recomienda:

- a) Para temperaturas $\approx 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ usar el paso $T=2$.
 Para temperaturas $\geq 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ usar el paso $T=1$.
- b) Leer un dosímetro irradiado con todos los parámetros en el Harshaw 2000 colocados según la dosis que se usa, ver el valor máximo que se alcanza en el electrómetro del 2000 B y escoger el paso de amplificación según la relación siguiente:

Valor máximo en el electrómetro del Harshaw 2000 B	Paso de amplificación
≈ 10 a ≈ 20	TL = 4
≈ 30 a ≈ 60	TL = 3
≈ 85	TL = 2
no se usó	TL = 1

9. Existen dos opciones de trabajo:
 - a) Para **Ver** los datos en la pantalla de la computadora: seleccionar **On/Off** para iniciar, y seleccionar de nuevo **On/Off** para finalizar.
 - b) Para **Ver y Grabar** los datos: seleccionar **Save**, después **On/Off** para iniciar, y seleccionar de nuevo **On/Off** para finalizar, dar nombre del archivo con extensión .TXT, agregar comentarios si se quiere; para grabar el archivo marcar **OK**.

NOTA: El programa únicamente graba en disco los datos en múltiplos de 40 (el número de datos se muestra en la ventana de **Samples/Channel**). Asegurarse de que los valores de la curva de brillo que se quieran grabar queden dentro de alguno de estos múltiplos, de lo contrario se perderán los últimos valores.

10. Cuando se quiera salir del programa DAQWare seleccionar **Return**. Del Menú seleccionar **Quit!**.

Este procedimiento, junto con el seguido tradicionalmente para leer los dosímetros en el lector Harshaw 2000, permitirán guardar en archivos para computadora la información de curvas de brillo, que podrá utilizarse para el análisis y deconvolución de las mismas.

3.6.2 Procedimiento para cambiar el formato de los archivos de curvas de brillo.

En al figura 3.8 se muestra un archivo generado con el sistema implantado según el método anterior. El archivo consta de un encabezado con los distintos parámetros usados en la adquisición, y dos columnas, una con los voltajes correspondiente a la señal TL (izquierda) y otra con los voltajes correspondientes a la rampa de temperatura (derecha).

```
DAQWare File
Version: 1.6
Number of Lines in Header: 10
Comment: Archivo C05, 195 nC
Date: 05-22-1998   Time: 17:33:03
Sample Rate:      10.0
Scan Rate: 0.0
File Format: 1
Samples per Channel: 200.0
Number of Channels: 2
Señal TL   Temperatura
1          0
10         10
0.089     0.032
0.094     0.033
0.089     0.034
0.088     0.037
0.088     0.043
0.092     0.047
0.089     0.049
0.088     0.054
0.088     0.052
0.089     0.056
0.089     0.059
0.086     0.066
•
•
•
200 pares
```

Figura 3.8 Archivo generado por la tarjeta y el programa de adquisición de datos, formado por un encabezado con parámetros de la adquisición, una columna con valores de la señal TL (izquierda) y otra con valores de la rampa de temperatura (derecha).

Es necesario cambiarle el formato al archivo generado para que sea aceptado por el programa de deconvolución CGCD (véase sección 3.5).

Para realizar los cambios requeridos se utiliza el programa escrito en FORTRAN y llamado har2000, que multiplica por 1000 y enumera a la columna de la Señal TL; además de eliminar la columna de Temperatura y el encabezado del archivo.

```
C ***** har2000, archivo de salida: canal, altura*1000
      dimension T(500),G(500)
      character*15 entrada, salida
10     write(*,20)
20     format (1x,'nombre del archivo de datos:  ')
      read(*,25) entrada
25     format(a15)
27     open(unit=5,file=entrada,status='old')
c      write(*,*) 'señal termoluminiscente?'
c      read(*,*) stl
      write(*,30)
30     format (1x,'nombres del archivo de salida:  ')
      read(*,25) salida
      open(unit=6,file=salida,status='new')
      do 40 i=1,13
      read(5,25) a
40     continue
      l=1
80     read(5,*,end=85) g(l), t(l)
      l=l+1
      i=l-1
      goto 80
85     write(6,90) i
      factor=100
      write(6,100) (ll,g(ll)*factor,ll=1,i)
90     format (5x,i3)
100    format (5x,i3,5x,f6.2)
c      goto 10
250   stop
      end
```

(Programa realizado por la Dra. Isabel Gamboa de Buen del ICN UNAM).

En la figura 3.9 se tiene el mismo archivo de la figura 3.8, procesado por el programa en FORTRAN anterior, ya con el formato adecuado para ser usado por el programa de deconvolución CGCD. El número superior 200 indica el número total de pares de datos del archivo; la columna de la izquierda, definida como Canal, es la

enumeración de la columna de la derecha que contiene los valores de la Señal TL de la curva de brillo.

```
200
1      89
2      94
3      89
4      88
5      88
6      92
7      89
8      88
9      88
10     89
11     89
12     86
13     87
14     94
15     94
16     93
17     95
18     95
19     94
20     92
•
•
•
200 Pares
```

Figura 3.9 Archivo con el formato adecuado para ser usado por el programa de deconvolución CGCD; este archivo se obtiene a partir del archivo de la figura 3.8 usando el programa en FORTRAN har2000 descrito en la página anterior. El número 200 indica el número total de pares de datos del archivo; la columna de la izquierda, definida como Canal, es la enumeración de la columna de la derecha, que contiene los valores de la Señal TL de la curva de brillo.

Ya una vez realizado todo el proceso descrito, se tiene un archivo con el formato adecuado para realizar la deconvolución de la curva de brillo y obtener información sobre el dosímetro y/o el campo de radiación que la generó.

4. Verificación del sistema usando TLD-100 irradiado con rayos gamma.

Para verificar el funcionamiento y la confiabilidad del sistema compuesto por el equipo lector TL Harshaw 2000, el amplificador y la tarjeta Lab-PC+ se realizó un estudio de curvas de brillo de dosímetros TLD-100 (LiF: Mg, Ti) irradiados con rayos gamma de ^{60}Co .

Se utilizó dicho dosímetro por ser ampliamente conocidos su comportamiento y su respuesta para que, en caso de que el sistema implantado no funcionara adecuadamente, se pudiera detectar fácilmente alguna anomalía.

El Laboratorio de Dosimetría de la Radiación del Instituto de Física cuenta con otro lector TL, el Harshaw modelo 3500, más moderno y diseñado de fábrica para funcionar conectado a una computadora. Las medidas obtenidas con este lector son de gran confiabilidad y se usa en investigaciones importantes, por lo cual se usará como referencia de la confiabilidad del sistema implantado.

Con el sistema implantado y con el Harshaw 3500 se miden las respuestas de dosímetros TLD-100 irradiados bajo las mismas condiciones. Los resultados obtenidos con ambos equipos fueron comparados con objeto de observar su consistencia.

4.1 Descripción del experimento.

Los pasos que se siguieron para realizar la prueba son:

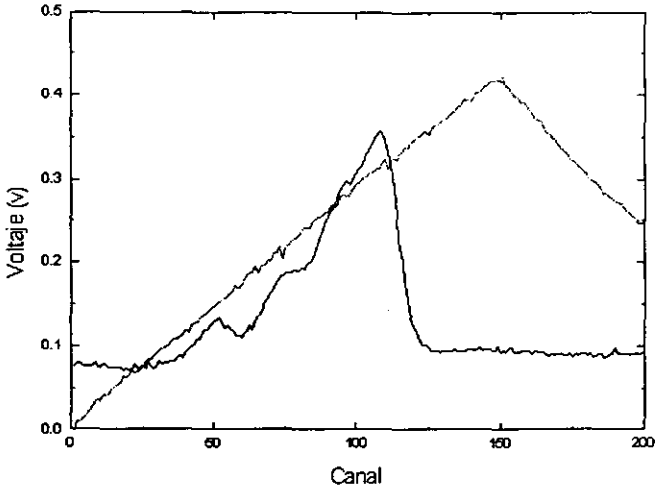
1. Se usan diez dosímetros TLD-100 (LiF: Mg, Ti).
2. Se irradian seis dosímetros a 0.005 Gy, y cuatro a 0.01 Gy con rayos gamma de ^{60}Co , siguiendo el protocolo del Laboratorio para el TLD-100 (apéndice A).
3. Se leen cinco dosímetros, tres irradiados a 0.005 Gy y dos a 0.01 Gy, con el sistema compuesto por el lector TL Harshaw 2000, el amplificador, la tarjeta digitalizadora Lab-PC+ y el programa de adquisición de datos DAQWare.
4. El lector TL, la tarjeta y el programa DAQWare proporcionan la Señal TL y Temperatura de la curva de brillo en un archivo ASCII. Con el programa en Fortran (apéndice C), se cambia el formato de este archivo en uno adecuado para ser leído por el programa CGCD de deconvolución. Se realiza la deconvolución de las curvas de brillo. Se obtienen las áreas, las alturas y los canales de los picos individuales de las curvas de brillo. (NOTA: canal =

posición en el eje X del máximo del pico. Como se vera más adelante, para el sistema Harshaw 2000 más tarjeta se tiene que canal \neq temperatura).

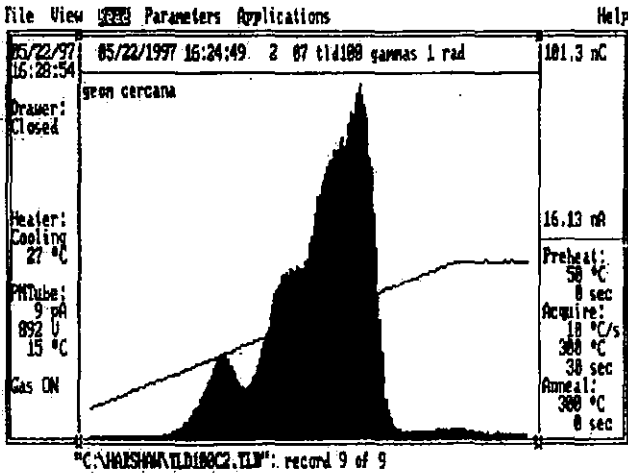
5. Por otro lado, se leen los cinco dosímetros restantes, tres de 0.005 Gy y dos de 0.01 Gy, con el lector Harshaw 3500, siguiendo el protocolo del laboratorio para el TLD-100 (apéndice A); se hace la deconvolución de las curvas de brillo con el CGCD y se obtienen las áreas, las alturas y los canales de los picos individuales de las curvas de brillo. (NOTA: para el Harshaw 3500 se tiene que canal = temperatura)
6. Los resultados obtenidos con el equipo lector TL Harshaw 2000 y la tarjeta Lab-PC+, se comparan con los obtenidos con el Harshaw 3500, con objeto de observar su consistencia. Los parámetros que se comparan son: forma de la curva de brillo, área total bajo la curva de brillo (carga), y cálculo de la relación $(p_5-p_3) / p_5$ para áreas, alturas y canales de los picos.

4.2 Resultados.

En la figura 4.1 tenemos ejemplos de curvas de brillo del TLD-100 obtenidas con el Lector Harshaw 2000 y tarjeta Lab-PC+, y con el Lector Harshaw 3500.



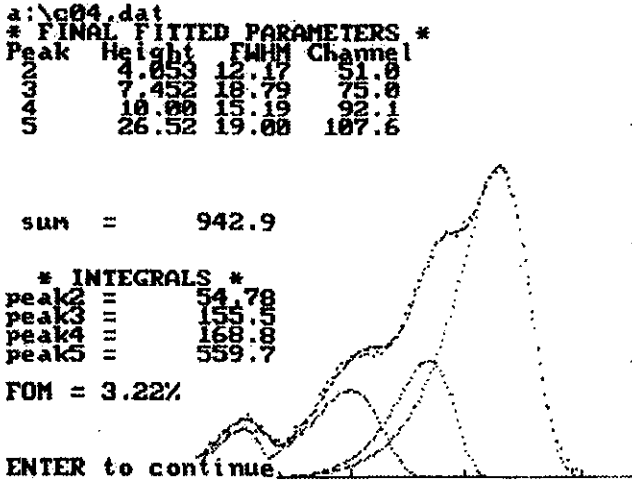
a)



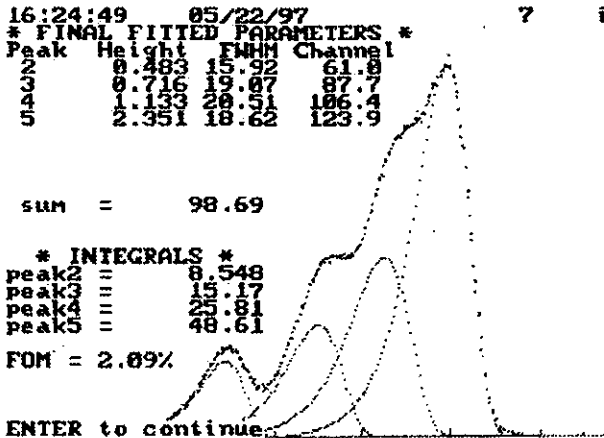
b)

Figura 4.1 Curvas de brillo del TLD-100, irradiado a 0.01 Gy (1 rad) con rayos gamma de ^{60}Co , obtenidas con: a) Lector Harshaw 2000 y tarjeta Lab-PC+, b) Lector Harshaw 3500.

En la figura 4.2 tenemos la deconvolución de las curvas de brillo obtenidas en el paso anterior con el Lector Harshaw 2000 y tarjeta Lab-PC+, y con el Lector Harshaw 3500. La deconvolución se hace con el programa de deconvolución CGCD.



a)



b)

Figura 4.2 Deconvolución de las curvas de brillo de la figura 4.1. Como se mencionó, son curvas de brillo del TLD-100 irradiado a 0.01 Gy (1 rad) con rayos gamma de ^{60}Co , obtenidas con a) Lector Harshaw 2000 y tarjeta Lab-PC+, b) Lector Harshaw 3500. En ambos caso se utilizó el programa de deconvolución CGCD.

En la tabla 4.1 se encuentran los valores del área total bajo la curva (carga) y, obtenidas a través de deconvolución, las áreas, alturas y canales de cuatro de los picos que componen la curva de brillo del TLD-100. Así mismo se tiene el cálculo, para áreas, alturas y canales, de la relación $(p5-p3) / p5$, la cual da una medida de la proporción relativa entre pico 3 ($p3$) y pico 5 ($p5$). Se comparan valores relativos ya que la sensibilidad de los lectores TL Harshaw 2000 y Harshaw 3500 es distinta.

Sistema	2000 y Lab - PC+				3500							
Dosis (Gy)	0.005	0.005	0.01	0.01		0.005	0.005	0.005	0.01	0.01		
Carga (nC)	138	109	199	195		37.99	40.85	46.04	101.3	90.30		
Área	pico 2	28.98	30.61	54.78	58.25		2.596	2.648	3.075	8.548	6.000	
	pico 3	61.34	86.83	155.5	140.1		4.528	5.181	5.867	15.17	11.76	
	pico 4	94.50	110.6	168.8	154.6		10.40	8.904	10.44	25.81	20.86	
	pico 5	162.9	210.7	559.7	589.5		18.74	21.52	24.04	48.61	48.49	
	$p5-p3$	62.3	58.8	72.2	76.2	67	75.8	75.9	75.6	68.8	75.7	74
p5					±						±	
(%)					8						3	
Altura	pico 2	1.972	2.347	4.053	4.557		0.147	0.153	0.172	0.483	0.337	
	pico 3	2.801	3.908	7.452	6.891		0.225	0.251	0.280	0.716	0.552	
	pico 4	4.015	6.009	10.00	8.308		0.458	0.425	0.481	1.133	0.970	
	pico 5	7.649	11.82	26.52	25.96		0.986	1.053	1.184	2.351	2.362	
	$p5-p3$	63.3	66.9	71.9	73.4	69	77.1	76.1	76.3	69.5	76.6	75
p5					±						±	
(%)					5						3	
Canal	pico 2	47	51	51	52		60	59	60	61	60	
	pico 3	70	74	75	76		86	86	86	88	87	
	pico 4	87	92	92	92		107	105	106	106	107	
	pico 5	104	108	108	109		124	122	123	123	124	
	$p5-p3$	32.7	31.5	30.6	30.3	31	30.6	29.5	30.1	29.0	29.8	29.8
p5					±						±	
(%)					1						0.60	

Tabla 4.1 Valores del área total bajo la curva de brillo (carga), de las áreas, alturas y canales de cuatro de los picos que componen la curva del TLD-100, y del cálculo de la relación $(p5-p3) / p5$ para áreas, alturas y canales.

4.3 Análisis.

Como se mencionó, usando el TLD-100 irradiado bajo las mismas condiciones, los resultados obtenidos con el equipo lector TL Harshaw 2000 y la tarjeta Lab-PC+, se comparan con los obtenidos con el Harshaw 3500, con objeto de observar su consistencia. Los parámetros que se comparan son: forma de la curva de brillo, área total bajo la curva de brillo (carga), y cálculo de la relación $(p5-p3)/p5$ para áreas, alturas y canales de los picos. Los resultados de tales comparaciones se muestran en la tabla 4.2.

Sistema	2000 y Lab-PC+	3500
Forma de la curva de brillo	OK	OK
Área total bajo la curva o carga	$A_{2000} = 2 A_{3500}$	$A_{3500} = \frac{1}{2} A_{2000}$
Área $\frac{p5-p3}{p5}$	67 ± 8 (%)	74 ± 3 (%)
Altura $\frac{p5-p3}{p5}$	69 ± 5 (%)	75 ± 3 (%)
Canal $\frac{p5-p3}{p5}$	31 ± 1 (%)	29.8 ± 0.6 (%)

Tabla 4.2 Comparación de los resultados obtenidos con el equipo lector TL Harshaw 2000 y la tarjeta Lab-PC+, y los obtenidos con el Harshaw 3500. Los parámetros que se comparan son: forma de la curva de brillo, área total bajo la curva de brillo (carga), y cálculo de la relación $(p5-p3) / p5$ para áreas, alturas y canales de los picos.

En la figura 4.3 se grafican los valores promedios obtenidos para las proporciones relativas de las áreas, alturas y canales de los picos 3 y 5, según la relación $(p5-p3)/p5$, con sus respectivas incertidumbres. Se puede observar que tales incertidumbres se traslapan, lo que nos lleva a deducir que las curvas de brillo obtenidas con el sistema Harshaw 2000 más la tarjeta Lab-PC+ y el Harshaw 3500 son equivalentes.

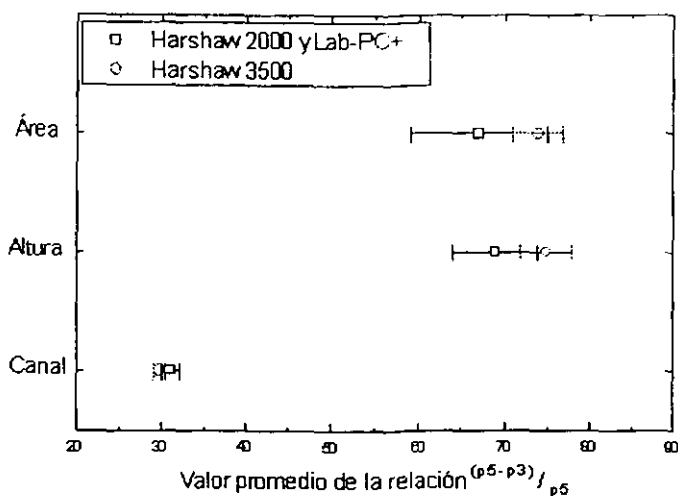


Figura 4.3 Gráfica de las proporciones relativas de las áreas, alturas y canales de los picos 3 y 5 dadas por la relación $(p5-p3) / p5$, obtenidas para el sistema Harshaw 2000 más la tarjeta Lab-PC+ y el Harshaw 3500; puede observarse que las incertidumbres de tales proporciones se traslapan.

4.4 Conclusiones.

Las conclusiones de la verificación del sistema compuesto por el lector TL Harshaw 2000 y la tarjeta Lab-PC+, con base en los resultados que se obtuvieron, son las siguientes:

1. En la pantalla de la computadora se obtiene la curva de brillo del TLD-100, tal que su estructura es similar a la reportada en la bibliografía.
2. En la pantalla de la computadora se obtiene la rampa de temperatura, tal que sigue el comportamiento observado en la aguja del medidor de temperatura del lector TL Harshaw 2000.
3. La curva de brillo obtenida con el sistema de lector Harshaw 2000 y tarjeta se aprecia con un "poco" más de ruido comparada con la obtenida con el Harshaw 3500 (véase figura 4.1).
4. La lectura del área bajo la curva en el Harshaw 2000 es aproximadamente el doble de la obtenida en el Harshaw 3500. Esto se debe a que cada equipo utiliza distintos voltajes de operación, y a que los tubos fotomultiplicadores presentan distintas respuestas de a la luz emitida por el DTL.

5. Se puede obtener un archivo ASCII con los datos de la curva de brillo y de rampa de temperatura, que hace posible la deconvolución de la curva de brillo, además de ampliar las posibilidades de su manejo con otros programas de cómputo. Antes de acoplar la tarjeta Lab-PC+ al equipo TL Harshaw 2000, esto no era posible.
6. Se observa que existe un aumento en una constante en el valor de las lecturas de las curvas de brillo, lo que se debe a un voltaje de "offset" provocado por la electrónica del Harshaw 2000. Tal problema se minimiza restando a las curvas de brillo una constante al momento de hacer la deconvolución; aunque lo ideal sea eliminar el problema con un circuito de "offset-null" que restaría ese voltaje. Se estudiará en qué lugar colocar tal circuito.
7. Se observa que para el sistema Harshaw 2000 más tarjeta Lab-PC+, los canales se manejan como en un equipo multicanal y no se pueden relacionar de forma directa con una temperatura si no es a través de un trabajo de interpolación. Así hay que dividir el intervalo de temperatura en el que se leyó el cristal, entre el número de canales, que nos da una equivalencia para cada caso particular de ΔT_i :

$$k_i = \frac{\Delta T_i}{N^\circ \text{ de canales}} \quad (4.1)$$

8. Para el inicio de toma de datos, se tiene que presionar el interruptor de inicio de lectura del Harshaw 2000 y la tecla del "mouse" de la PC donde está instalada la tarjeta Lab-PC+. Como es difícil presionar los dos controles al mismo tiempo, se tiene que no es reproducible el valor del canal donde quedan los picos de las curvas de brillo.
9. Las curvas de brillo obtenidas con el sistema implantado y el Harshaw 3500 son similares, ya que las proporciones relativas de las áreas, alturas y canales para los picos 3 y 5 tienen incertidumbres que se traslapan (véase figura 4.3).

De lo anterior se puede concluir que el sistema compuesto por el equipo lector TL Harshaw 2000 y la tarjeta Lab-PC+ representa una mejor opción de adquisición de información con respecto al lector Harshaw 2000 solo, ya que se puede obtener mucha más información sobre las curvas de brillo, siendo muy útil para trabajos que no requieren de un alto grado de precisión y exactitud en las medidas ya que para tal tipo de medidas se utiliza el Harshaw 3500.

5. Estudio del TLD-300 irradiado con rayos gamma usando el sistema compuesto por el lector Harshaw 2000 y la tarjeta Lab-PC+.

Uno de los principales objetivos de este trabajo de tesis es estudiar la respuesta del TLD-300 cuando se irradia con rayos gamma utilizando el sistema compuesto por el lector TL Harshaw 2000 y la tarjeta de adquisición de datos Lab-PC+. Tal respuesta, en el intervalo de linealidad, es útil como referencia para determinar la sensibilidad del dosímetro a otros tipos de radiación.

5.1 Descripción de experimento.

Los pasos del desarrollo experimental son:

1. Se seleccionan los dosímetros con base en las pruebas de uniformidad y reproducibilidad de las medidas de los dosímetros TLD-300.
2. Se irradian los DTL a dosis entre 10^{-4} y 5 Gy con rayos gamma de ^{60}Co .
3. La lectura de la respuesta se digitaliza con una tarjeta de adquisición de datos instalada en una PC, acoplada a un lector TL, Harshaw 2000.
4. Se cambia el formato de los archivos generados a uno adecuado para ser leído por el programa de deconvolución.
5. Se realiza la deconvolución de las curvas de brillo para separarlas en sus picos componentes, del 3 al 6, mediante el programa de cómputo comercial CGCD y usando curvas acordes con el modelo de Randall y Wilkins.

Cada uno de esos pasos se describen a continuación:

1. Selección de los dosímetros.

Se utilizan dosímetros TLD-300 ($\text{CaF}_2:\text{Tm}$) de Harshaw / Bicron ($3 \times 3 \times 0.9$ mm). Primero se hace una selección de dosímetros con base en las pruebas de uniformidad y reproducibilidad de las medidas de los dosímetros. Estas pruebas proporcionan la información necesaria que permite el agrupamiento de DTL con respuestas similares y la eliminación de los que tienen respuestas cuya diferencia con el valor promedio es mayor que la desviación estándar. El proceso y el resultado de las pruebas se describe a continuación:

a) Uniformidad de la medida de un lote de dosímetros.

Las pruebas de uniformidad de medida deben incluir a todos los dosímetros TL que serán utilizados en un lote de medición, o al menos un número estadísticamente significativo si el lote es demasiado grande. Los resultados de las pruebas indican el grado en el cual la respuesta de un DTL se compara con la respuesta de cualquier otro dosímetro del mismo lote. El ANSI-NRP [N 545] (organismo internacional que establece las normas y especificaciones para dosimetría termoluminiscente), recomienda que la respuesta de un DTL no debe diferir de otro DTL en más de un 30%.

De un lote de veinticinco dosímetros TLD-300 se seleccionan doce para realizar las medidas. Siguiendo el protocolo del laboratorio para el TLD-300 (apéndice B), se irradian los veinticinco DTL a una dosis de 0.12 Gy de radiación β del ^{90}Sr ($\cong 30$ s de irradiación con la fuente usada); se hace la lectura de su señal TL en el Harshaw 2000, los valores obtenidos de la señal TL del área bajo la curva (carga) se muestran en la figura 5.1.

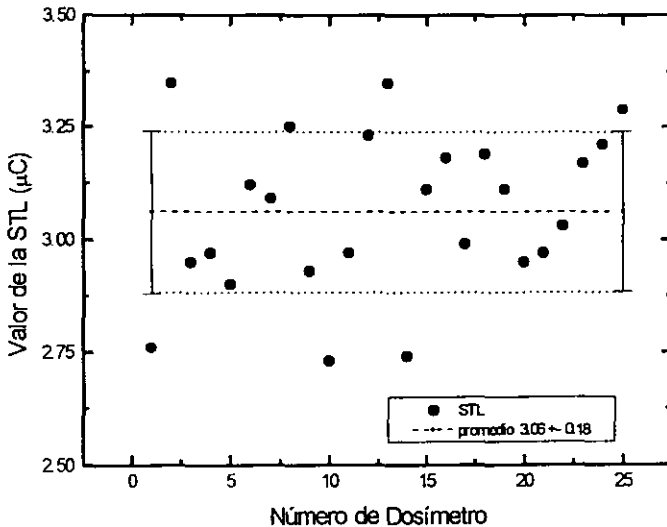


Figura 5.1 Valores de la señal TL, obtenidos para la selección de dosímetros, usando la uniformidad en las medidas de un lote de dosímetros.

Se calcula el promedio de las respuestas TL ($3.06 \pm 0.18 \mu\text{C}$), y se seleccionan los dosímetros cuya respuesta TL se encuentra más próxima al

promedio. Así se obtienen doce dosímetros, cuya dispersión en su respuesta resulta menor o igual que un 3.6 % del promedio, y con los cuales se trabajará en lo subsecuente.

b) Reproducibilidad de las medidas de un dosímetro.

La dispersión en la medida de la señal TL de un solo DTL cuando es irradiado varias veces a una misma dosis conocida permite tener una medida de la reproducibilidad del dosímetro. Aquellos dosímetros que muestran una desviación estándar mayor a una preestablecida son desechados. ANSI-NRP [N 545] recomienda que ésta no sea mayor que el 10% del valor promedio de todas las lecturas.

Los doce dosímetros seleccionados se dividen en cuatro grupos de tres DTL cada uno, y con un grupo tomado al azar se realiza la prueba de reproducibilidad. Siguiendo el protocolo del laboratorio (apéndice B), se irradian los tres DTL del grupo seleccionado, a una dosis de 0.12 Gy de radiación β del ^{90}Sr ; se hace una lectura de su respuesta en el Harshaw 2000. Se repite cinco veces este procedimiento. Los valores obtenidos de la señal TL del área bajo la curva (carga) se muestran en la figura 5.2.

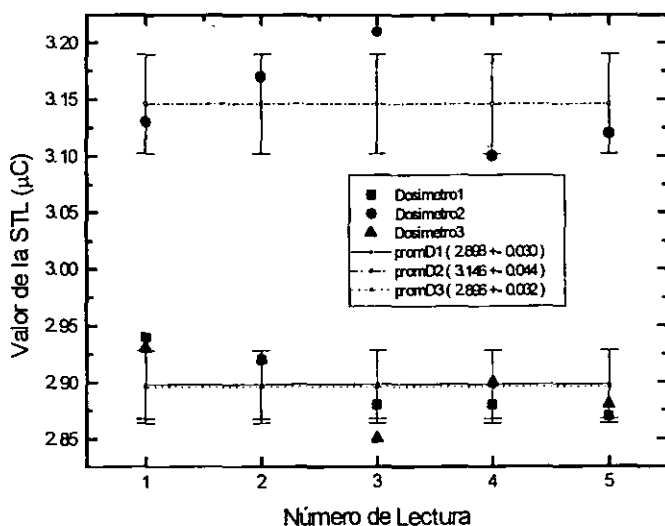


Figura 5.2 Valores de la señal TL obtenidos para evaluar la reproducibilidad de la respuesta de un dosímetro a irradiaciones sucesivas.

2. Irradiación con rayos gamma de ^{60}Co .

Los cuatro grupos de tres dosímetros cada uno se irradian, siguiendo el protocolo del laboratorio (apéndice B), a dosis entre 1×10^{-4} y 5 Gy con rayos gamma de ^{60}Co . Se usa la fuente del Instituto de Física para las dosis pequeñas y la fuente Gammacell, del Instituto de Ciencias Nucleares, para las dosis mayores. Las dosis con las que se irradian se muestran en la tabla 5.1.

Dosis (Gy)	Dosis (mrad)	Fuente utilizada	
		IF UNAM	ICN UNAM
1×10^{-4}	1×10^1	√	
3×10^{-4}	3×10^1	√	
6×10^{-4}	6×10^1	√	
1×10^{-3}	1×10^2	√	
3×10^{-3}	3×10^2	√	
6×10^{-3}	6×10^2	√	
1×10^{-2}	1×10^3	√	
3×10^{-2}	3×10^3	√	
2×10^{-1}	2×10^4	√	
0.786	78 600	√	√
2.115	211.500	√	√
5×10^0	5×10^5		√

Tabla 5.1 Dosis gamma a las que se irradian los dosímetros TLD-300.

3. Lectura de la respuesta de los DTL con el sistema implantado.

Se leen todos los dosímetros, con una primera y segunda lectura de acuerdo al protocolo del laboratorio para el TLD-300 (apéndice B), usando el sistema compuesto por el lector TL Harshaw 2000, la tarjeta digitalizadora Lab-PC+ y el programa de adquisición de datos DAQWare. El Harshaw 2000 proporciona por sí mismo el área total bajo la curva de brillo (carga), y en conjunto con los demás componentes proporciona los valores de la Señal TL y de la Temperatura de la curva de brillo en un archivo ASCII. El promedio del área total bajo la curva de brillo (carga) de la primera lectura para cada una de las dosis se muestra en la tabla 5.2, y su gráfica en la figura 5.3.

Dosis (Gy)	Dosis (mrad)	Promedio del área total bajo la curva (carga) de la primera lectura (nC)
1×10^{-4}	1×10^1	16.83 ± 0.32
3×10^{-4}	3×10^1	44.5 ± 1.2
6×10^{-4}	6×10^1	89.9 ± 2.9
1×10^{-3}	1×10^2	143.3 ± 3.5
3×10^{-3}	3×10^2	429 ± 5.6
6×10^{-3}	6×10^2	851 ± 17
1×10^{-2}	1×10^3	$1\ 380 \pm 30$
3×10^{-2}	3×10^3	$4\ 240 \pm 490$
2×10^{-1}	2×10^4	$27\ 350 \pm 150$
0.786	78 600	$102\ 500 \pm 500$
2.115	211.500	$281\ 000 \pm 10\ 580$
5×10^0	5×10^5	$735\ 670 \pm 46\ 540$

Tabla 5.2 Promedio del área total bajo la curva de brillo (carga) de la primera lectura para cada una de las dosis con las que se irradian los dosímetros.

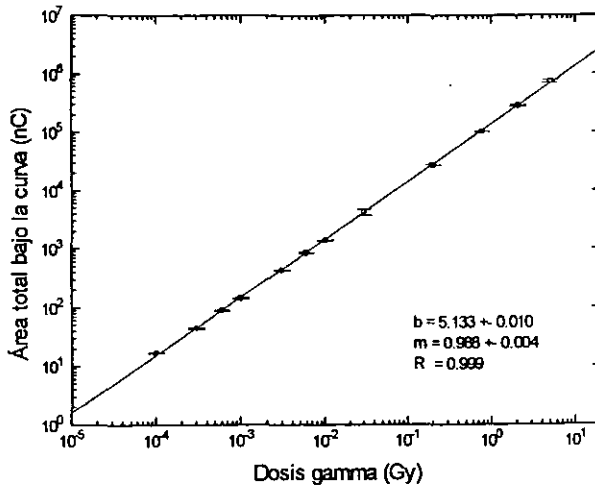


Figura 5.3 Gráfica de los valores promedio del área total bajo la curva de brillo (carga) de la primera lectura para cada una de las dosis con las que se irradian los dosímetros.

4. Cambio de formato de los archivos.

Se cambia el formato de los archivos de las curvas de brillo a uno adecuado para ser leído por el programa CGCD de deconvolución.

Primero se procesan las curvas con el programa FORTRAN llamado har2000 (sección 3.6.2), pero se observa al momento de realizar la deconvolución que no se puede restar en varias curvas la constante que produce el "offset" del Harshaw 2000 (sección 4.4). Por lo que es necesario hacer otro programa en FORTRAN, el har20001 que además de hacer lo mismo que el har2000, le resta a las curvas el valor de "offset" correspondiente al paso TL que se utiliza en la lectura (véase el proceso completo en el apéndice C). Procediendo así, se tienen los archivos listos para realizar la deconvolución.

5. Deconvolución de las curvas de brillo.

Se realiza la deconvolución de las curvas de brillo para separarlas en sus picos componentes, del 3 al 6, mediante el programa de cómputo comercial CGCD; en la deconvolución se usan curvas acordes con el modelo de Randall y Wilkins.

5.2 Resultados.

Con los valores obtenidos, a través de la deconvolución, de las áreas y las alturas de los picos individuales de las curvas de brillo se elaboran las curvas de respuesta como función de la dosis.

En las siguientes figuras se encuentran las curvas de respuesta como función de la dosis, obtenidas para el área total bajo la curva y para los picos individuales:

Figura 5.4 Curva de respuesta como función de la dosis para el área total bajo la curva, sin hacer deconvolución y restando la segunda lectura, cuyo valor no contribuye a la respuesta

Figura 5.5 Curva de respuesta como función de la dosis para el área bajo los picos 3, 4, 5 y 6.

Para tener una mejor apreciación, se grafican de manera separada los picos 3 y 5 y los picos 4 y 6.

Figura 5.6 Curva de respuesta como función de la dosis para el área bajo los picos 3 y 5.

Figura 5.7 Curva de respuesta como función de la dosis para el área bajo los picos 4 y 6.

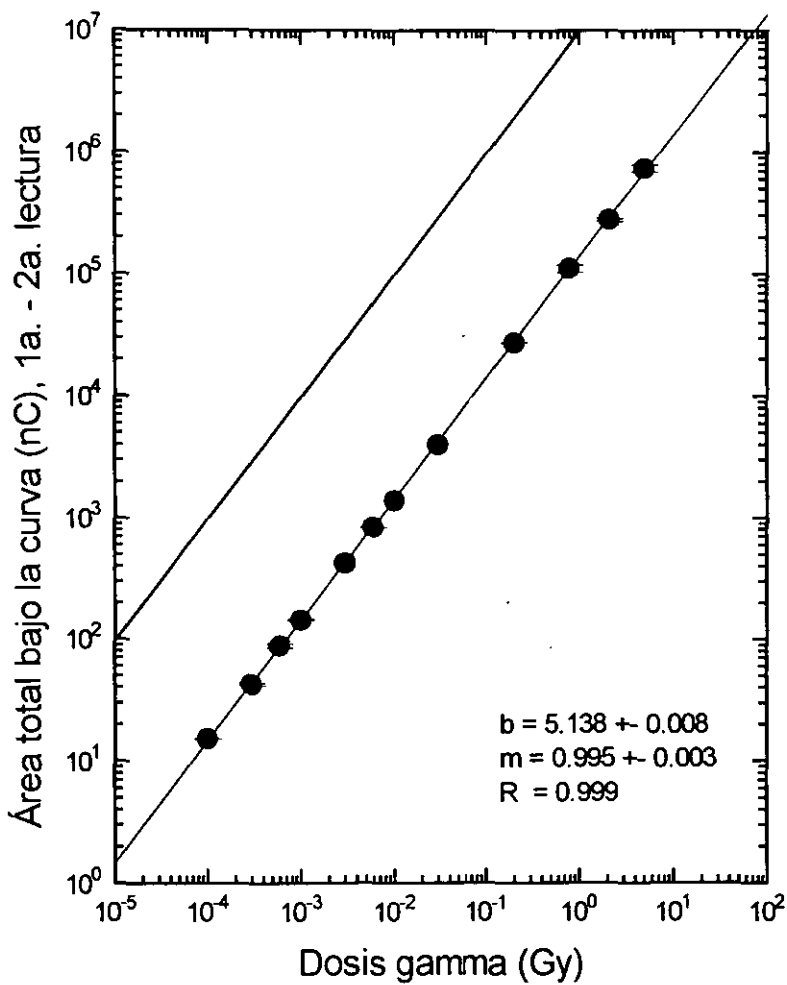


Figura 5.4 Curva de respuesta del TLD-300 irradiado con rayos γ de ^{60}Co , como función de la dosis, para el área total bajo la curva.

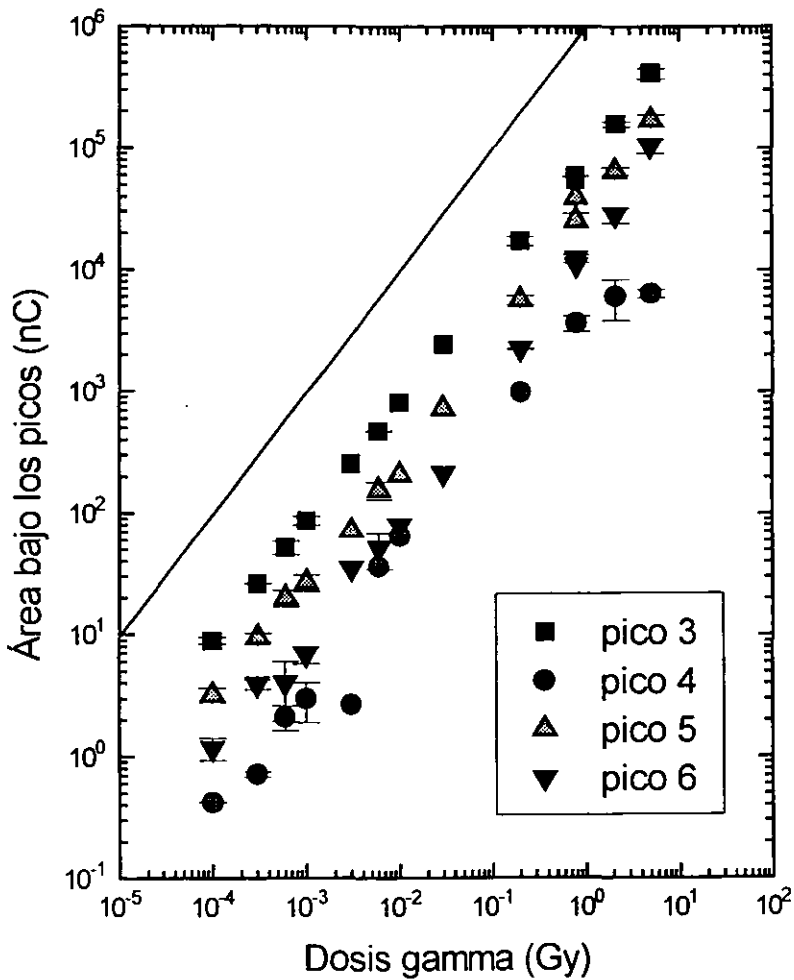


Figura 5.5 Curva de respuesta del TLD-300 irradiado con rayos γ y de ^{60}Co , como función de la dosis, para el área bajo los picos 3,4,5 y 6.

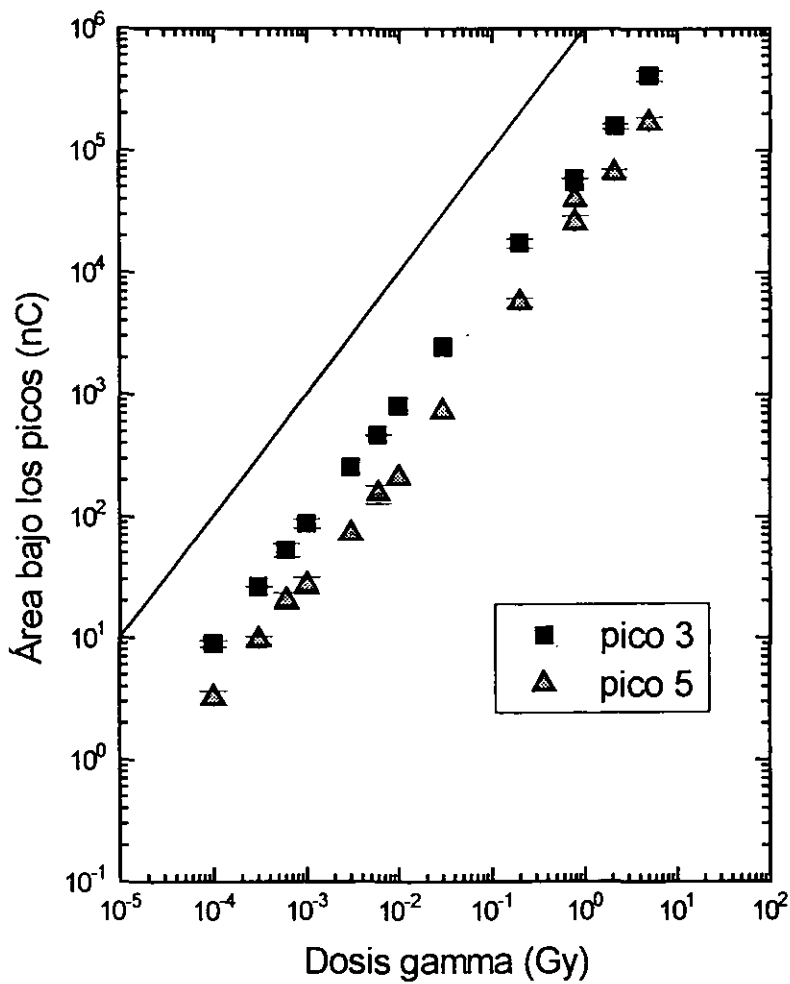


Figura 5.6 Curva de respuesta del TLD-300 irradiado con rayos γ y de ^{60}Co , como función de la dosis, para el área bajo los picos 3 y 5.

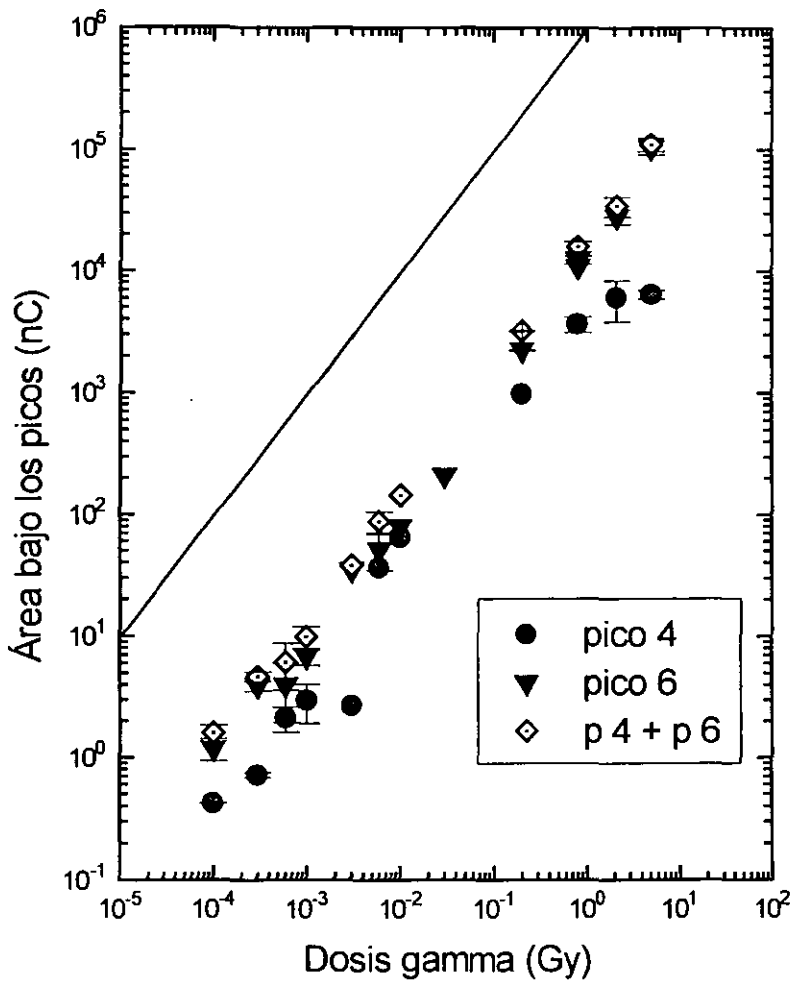


Figura 5.7 Curva de respuesta del TLD-300 irradiado con rayos γ y de ^{60}Co , como función de la dosis, para el área bajo los picos 4 y 6.

5.3 Análisis.

Así, con base en las curvas de respuesta como función de la dosis que se obtuvieron se puede mencionar que:

1. El área total bajo la curva presenta un comportamiento lineal en el intervalo de 10^{-4} a 5 Gy (véase figura 5.4).
2. El área bajo los picos 3 y 5 presenta un comportamiento lineal en el intervalo de 10^{-4} a 5 Gy (véase figura 5.6).
3. Parece haber una relación entre los picos 4 y 6, que quizá dependa de la forma en que se aplica la deconvolución (véase figura 5.7 y note el comportamiento lineal de la suma del área bajo los picos 4 y 6).
4. El comportamiento lineal de los valores del área total bajo la curva (figura 5.4) y bajo los picos 3 y 5 (figura 5.6) refuerza la confianza en el desempeño y en los resultados del sistema compuesto por el equipo lector Harshaw 2000, el amplificador y la tarjeta Lab-PC+; logrando así una mejor opción de adquisición de información con respecto al lector Harshaw 2000, ya que se puede obtener mucha más información sobre las curvas de brillo.
5. Otro hecho que también refuerza la confianza en el sistema implantado, es que la estructura de las curvas de brillo del TLD-300 que se obtiene es similar a la reportada en la bibliografía (véase figura 5.8).

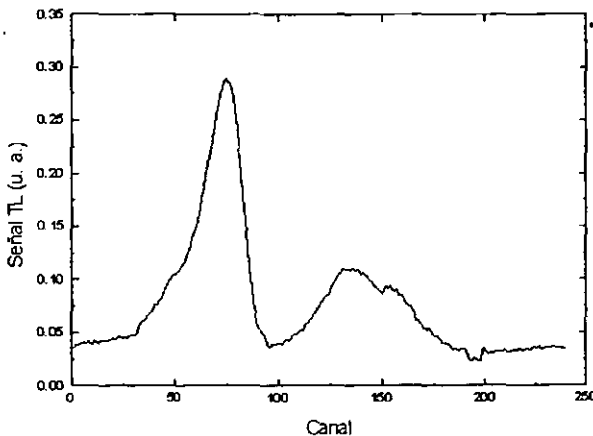


Figura 5.8 Curva de brillo del TLD-300, irradiado a 3×10^{-2} Gy (3 rad) con rayos gamma de ^{60}Co , obtenida con el sistema compuesto por el equipo lector Harshaw 2000, el amplificador y la tarjeta Lab-PC+.

6. Conclusiones.

En el capítulo 1 se menciona que los dos objetivos principales de este trabajo de tesis son:

1. Acoplar un equipo TL Harshaw 2000 con una computadora, a través de una tarjeta de adquisición de datos, de tal manera que se puedan generar archivos con datos de las curvas de brillo, provenientes del lector TL, para que puedan ser analizadas y realizar su deconvolución con un programa de cómputo.
2. Utilizar el sistema implantado para estudiar la respuesta TL del dosímetro $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ (TLD-300) a la radiación gamma de ^{60}Co . Tal respuesta en el intervalo de linealidad, se usó como referencia para determinar la sensibilidad del TLD-300 a otros tipos de radiación [Bue 99].

Para el primer objetivo, y a partir de las conclusiones que se encuentran en la sección 4.4, se resumen las más importantes:

1. Se obtiene un archivo con los datos de la curva de brillo del dosímetro bajo estudio y la rampa de temperatura del calentamiento que recibe el dosímetro. Este archivo de datos permite la deconvolución de la curva de brillo, y es importante mencionar que esto no era posible antes de acoplar la tarjeta Lab-PC+ al equipo lector Harshaw 2000.
2. Las curvas de brillo obtenidas con el sistema Harshaw 2000 más la tarjeta Lab-PC+ y con el Harshaw 3500 son equivalentes, ya que las proporciones relativas de las áreas, alturas y canales para los picos más importantes, 3 y 5, tienen incertidumbres que se traslapan (véase figura 4.3).
3. Como se tienen dos interruptores para el inicio de toma de datos, uno es el interruptor de inicio de lectura del lector Harshaw 2000 y otro es la tecla del "mouse" de la PC donde está instalada la tarjeta digitalizadora, entonces será difícil presionar los dos interruptores al mismo tiempo provocando que no sea reproducible el valor del canal donde queden los picos de la curva. Esto se podría remediar cambiando el interruptor del Harshaw 2000 por un relevador activado por una señal digital de la tarjeta Lab-PC+. Así el único control de inicio de toma de datos sería la tecla del "mouse".
4. En el sistema implantado, los canales se manejan como en un equipo multicanal y no tienen una relación inmediata con una temperatura. Para encontrar la relación, hay que dividir el intervalo de temperatura en el que se leyó el cristal, ΔT_i , entre el número de canales, lo que nos da una equivalencia para cada caso particular (véase punto 7 de la sección 4.4).

5. Se observaba un aumento en una constante en el valor de las lecturas de las curvas de brillo, debido a un voltaje de "offset" generado por la electrónica del Harshaw 2000. Tal problema se eliminó de las curvas, restando ese voltaje con un circuito de "offset-null" en el amplificador (véase apéndice C). Así, para futuras lecturas el sistema funcionará más convenientemente con una fuente de error menos.

Para el segundo objetivo, y a partir de los resultados obtenidos en la sección 5.2, se tienen las siguientes conclusiones:

1. Se obtienen curvas de respuesta como función de la dosis para el área total bajo la curva y bajo los picos 3 y 5, que presentan un comportamiento lineal en el intervalo estudiado (10^{-4} a 5 Gy).
2. Las curvas de respuesta como función de la dosis, en el intervalo de linealidad encontrado, son útiles como referencia para determinar la sensibilidad del dosímetro a otros tipos de radiación.
3. El comportamiento lineal de los valores del área total bajo la curva y bajo los picos 3 y 5, (véanse figuras 5.4 y 5.6) refuerza la confianza en los resultados del sistema implantado.

Por lo tanto se puede concluir que el sistema compuesto con el lector TL Harshaw 2000, el amplificador, la tarjeta Lab-PC+ y los programas relacionados, resulta ser una mejor opción de adquisición de datos con respecto al lector Harshaw 2000 solo, ya que se puede obtener mucha más información sobre las curvas de brillo.

Además, y a partir de la utilidad como referencia de las curvas de respuesta del TLD-300 irradiado con rayos γ de ^{60}Co que se encontraron, se puede considerar que este trabajo de tesis contribuye al estudio de la respuesta del TLD-300 a radiación α , β , γ , protones e iones de ^{12}C [Bue 99] que realiza grupo de Dosimetría de la Radiación del Instituto de Física de la UNAM.

7. Bibliografía.

- Ang 96 Angelone, M., Chiti, M., Esposito, A. *Measurement of Supralinearity Factor of $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ (TLD-300) Thermoluminescent Dosimeter*. NIM B **117** 428-430 (1996).
- Att 86 Attix F.H., *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. John Wiley and Sons, Inc., (1986).
- Bos 91 Bos, A. J. J., Dielhof, J. B. *The Analysis of Thermoluminescent Glow Peaks in $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ (TLD-300)*. Radiat. Prot. Dosim. **37(4)** 321-239 (1991).
- Bos 95 Bos, A. J. J., De Jong, R. W., Meijvogel, K. *Effects of Type of Radiation on Glow Curve and Thermoluminescence Emission Spectrum of CaF_2* . Radiation Measurement **24(4)** 401-405 (1995).
- Bue 99 Buenfil, A.E., Gamboa-deBuen, I, Ruiz-Trejo, C., Olvera, C., Rodríguez-Villafuerte, M., Rogers, R. C. and Brandan, M.E. *Response of TLD-300 to Heavy Charged Particles*. Radiat. Prot. Dosim. **84(1-4)** 273-275 (1999).
- CGC 88 *Computerized Glow Curve Deconvolution User Manual*, Harshaw / Filtrol (1988).
- Fur 83 Furetta, C. and Lee, Yi-Kang. *Annealing and Fading Properties of $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ (TLD-300)*. Radiat. Prot. Dosim. **5(1)** 57-63 (1983).
- Fur 85 Furetta, C. and Tuyn, J. W. N. *A Study of the Peak Ratios in $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ (TLD-300) as a Function of Beta Energy*. Radiat. Prot. Dosim. **11(4)** 263-266 (1985).
- H2K *Harshaw Model 2000 Thermoluminescence Detector Instruction Manual*, Harshaw.
- Hof 80a Hoffmann, W. Moller, G. *Heavy Particle Dosimetry with High Temperature Peaks of Thermoluminescent Materials*. NIM **175** 205-207 (1980).
- Hof 80b Hoffmann, W. Moller, G., Blattmann, H. and Salzmann, M. *Pion Dosimetry with Thermoluminescent Materials*. Phys. Med. Biol. **25(5)** 913-921 (1980).
- Hof 84 Hoffmann, W. and Prediger, B. *Heavy Particles Dosimetry with High Temperature Peaks of $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ and ^7LiF Phosphors*. Radiat. Prot. Dosim. **6(1-4)** 149-152 (1984).

- Hor 84 Horowitz Y. S. *Thermoluminescence and Thermoluminescent Dosimetry*, Vol. II. CRC Press (1984).
- Hsu 90 Hsu, P.C. and Li, S.H. *Influence of High Temperature Annealing on TL Response of CaF₂:Tm*. *Radiat. Prot. Dosim.* **33(1-4)** 189-191 (1990).
- ICRU 80 *International Commission on Radiation Units and Measurements* (1980).
- Lak 82 Lakshmanann, A. R., Chandra, B. and Bhatt, R. C. *Estimation of Quality and Intensity of Low Energy Photon Radiation Using a Single Sample of CaF₂:Tm*. *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* **33** 703-706 (1982).
- Lak 83 Lakshmanann, A. R. *Thermoluminescence Glow Curve Shape of CaF₂:Tm and ⁷LiF Produced by Alpha and Beta Radiations*. *Radiat. Prot. Dosim.* **5** 121-124 (1983).
- Lon 96 Loncol, Th., Hamal, M., Denis, J.M., Vynkier, S., Wambersie, A. and Scaliot, P. *Response Analysis of TLD-300 Dosimeters in Heavy-Particle Beams*. *Phys. Med. Biol.* **41** 1665-1678 (1996).
- LPC 93 *Lab-PC+ User Manual*, National Instruments (1993).
- Luc 77 Lucas, A. C. and Kapsar, B. M. *The Thermoluminescence of Thulium Doped Calcium Fluoride*. *Proc. Fifth Int. Conf. on Luminescence Dosimetry*, Sao Paulo, Brazil, (FRG: Physikalisches Institut, Giessen pp. 131 (1977).
- Mah 89 Mahesh K., Weng P. S. and Furetta C. *Thermoluminescence in Solids and its Applications*. Nuclear Technology Publishing (1989).
- Mak 85 Mc Keever S. W. S. *Thermoluminescence of Solids*. Cambridge University Press (1985).
- N 545 ANSI-NRP N545-1975. *American National Performance, Testing and Procedural Specifications for Thermoluminescent Dosimetry*, American National Standard Institute Inc. (Approved 1975).
- NDM 93 *NI-DAQ v. 4.5 User Manual, Data Acquisition Software*, National Instruments (1993).
- Ran 45 Randall, J. T. and Wilkins, M. H. F. *Phosphorescence and Electrons Traps*. *Proc. Roy. Soc.* **A184**, 366 (1945).
- Ran 79 Rank, E. X. and Theus, R. B. *Neutron Dosimetry with CaF₂:Tm*. *IEEE Trans. N. S.* **NS-26** 1590-1592 (1979).

- Ras 94 Rasheedy, M. S., Nishimura, F. and Ichimori T. *Studies on the Dosimetric Properties of TLD-300*. Radiat. Phys. Chem. **44(12)** 63-67 (1994).
- Sha 88 Shachar, B. B., Horowitz Y. S. *Dosimetric Characterization of the High Temperature Peaks of LiF:Mg,Ti and CaF₂:Tm Using Computerized Glow Curve Deconvolution*. Radiat. Prot. Dosim. **22(2)** 87-96 (1988).
- Sha 90 Shapiro J. *Radiation Protection Dosimetry, A Guide for Scientists and Physicians*. Harvard. (1990).
- Tem 81 Temme, A., Rassow, J. and Meissner, P. *A New Thermoluminescent Dosimetry Procedure Using TLD-300 Detectors for Clinical Dosimetry in Mixed Neutron-Gamma Rays Fields*. In: Proc. Fourth Symp. on Neutron Dosimetry II (Luxembourg: CEC) EUR 7448, 433-454 (1981).
- Tur 95 Turner J. E., *Atoms, Radiation, and Radiation Protection*. Second Edition, John Wiley and Sons, Inc., (1995).
- Wan 89 Wang, T. K., Hsu P. C. and Weng P. S. Appl. Radiat. Isot. **40** 329 (1989).
- Zar 94 Zárate A. *Medición de la radiación ambiental en el D. F. utilizando dosímetros termoluminiscentes*. Tesis de licenciatura, FC-UNAM (1994).

Apéndice A. Protocolo para la preparación, irradiación y lectura de dosímetros TLD-100.

Antes de irradiarse, los dosímetros deben de someterse a un tratamiento térmico, que consiste en un horneado a alta temperatura para restablecer sus características, borrando la señal acumulada durante su almacenamiento y dispersando las impurezas a su configuración original.

El protocolo del Laboratorio de Dosimetría del IF UNAM para el TLD-100 comprende los siguientes pasos:

1. Se hornean los dosímetros 1 h a 400°C. Después se enfrían a una rapidez aproximada de 75°C/min. Ya fríos se guardan en un sitio oscuro.
2. Aproximadamente 24 h después del horneado, se irradian y se guardan en un sitio oscuro.
3. Aproximadamente 24 h después de la irradiación, se leen en un ambiente de N₂.
4. Se hace una segunda lectura, inmediatamente después de la anterior. (Si la señal es pequeña o se quiere una deconvolución más confiable, es indispensable hacer la segunda lectura del dosímetro).

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

Apéndice B. Protocolo para la preparación, irradiación y lectura de dosímetros TLD-300.

Antes de irradiarse, los dosímetros deben de someterse a un tratamiento térmico, que consiste en un horneado a alta temperatura para restablecer sus características, borrando la señal acumulada durante su almacenamiento y dispersando las impurezas a su configuración original.

Los dosímetros se irradian usando un portadosímetro de lucita con una sola cavidad, de tal manera que sólo se irradia un dosímetro a la vez. El portadosímetro se colocó a una distancia fija de la fuente donde se conoce la tasa de dosis.

El protocolo del Laboratorio de Dosimetría del IF UNAM para el TLD-300 consta de los siguientes pasos:

1. Se hornean los dosímetros 1 h a 400°C. Después se enfrían a una rapidez aproximada de 75°C/min. Ya fríos se guardan en un sitio oscuro
2. Aproximadamente 24 h después del horneado, se irradian y se guardan en un sitio oscuro.
3. Aproximadamente 24 h después de la irradiación, se leen en un ambiente de N₂.
4. Se hace una segunda lectura, inmediatamente después de la anterior (Si la señal es pequeña o se quiere una deconvolución más confiable, es indispensable hacer la segunda lectura del dosímetro).

Apéndice C. Corrección del aumento en una constante en el valor de las lecturas de las curvas de brillo.

1. Corrección por software.

En las conclusiones de la verificación del sistema compuesto por el lector Harshaw 2000 y la tarjeta Lab-PC+ usando el TLD-100 (sección 4.4), se menciona que existe un aumento en una constante en el valor de las lecturas de las curvas de brillo.

Después de varias pruebas y análisis del sistema implantado y de las curvas de brillo, se encuentra que el valor constante que "sube" el cero de las curvas se debe a un voltaje de "offset" que produce el equipo Harshaw 2000 en la salida de la Señal TL.

En las medidas realizadas con el TLD-100 en el capítulo 4, se resuelve el problema restando a las curvas de brillo ese valor constante al momento de realizar la deconvolución con el programa CGCD.

Posteriormente, se piensa proceder de la misma manera con las medidas realizadas con el TLD-300 en el capítulo 5, pero se encuentra que en varias curvas no se puede restar la constante al momento de la deconvolución. Así, se busca otra forma para eliminar la constante, determinando restarla de los archivos de las curvas por medio de software.

Como primer paso, se determina el valor V_s del voltaje de offset que produce el Harshaw 2000, el amplificador y de la tarjeta Lab-PC+ para los pasos de amplificación TL0, TL1, TL2, TL3 y TL4 en el amplificador.

En la figura C.1 se muestran los valores V_s medidos para los pasos TL2, TL3 y TL4, que son los más usados en las lecturas realizadas. Nótese que para el intervalo de 1×10^{-10} a 1×10^{-6} el voltaje de offset es igual, y este es el que se considera para la corrección.

En la tabla C.1 se muestra el valor V_h del voltaje de offset que produce el Harshaw 2000, resultante de la división del valor V_s del offset que produce el Harshaw 2000, el amplificador y la tarjeta Lab-PC+, entre el valor de la amplificación A del paso TL correspondiente.

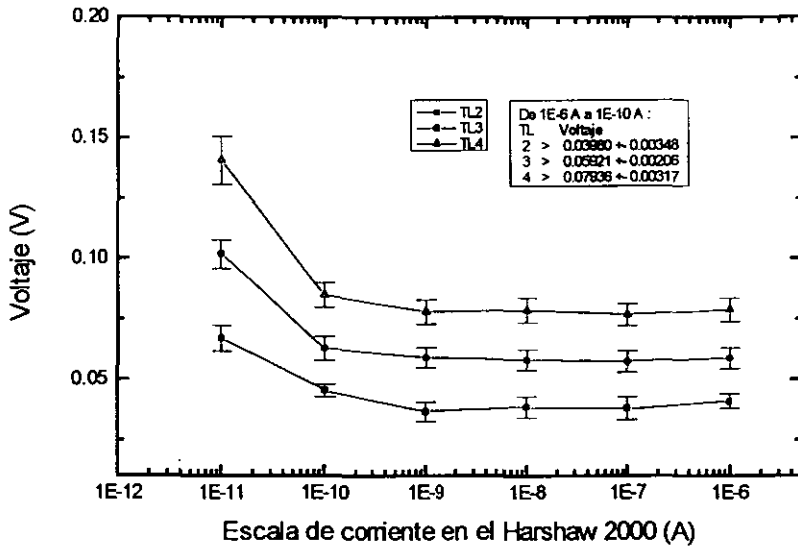


Figura C.1 Valor Vs del voltaje de offset que produce el Harshaw 2000, el amplificador y la tarjeta Lab-PC+ para los pasos de amplificación TL2, TL3 y TL4 en el amplificador.

Paso TL	Amplificación A	Valor Vs del offset que produce el Harshaw 2000, el amplificador y de la tarjeta Lab-PC+ (V)	Vh = Vs ÷ A Valor Vh del offset que produce el Harshaw 2000 (mV)
0	x1	0.00683	6.83
1	x2.5	0.01561	6.24
2	X5	0.03980	7.96
3	X7.5	0.05921	7.89
4	X10	0.07936	7.94

Tabla C.1 Voltaje Vs del offset que produce el Harshaw 2000, el amplificador y de la tarjeta Lab-PC+; y voltaje Vh de offset que produce el Harshaw 2000.

Como segundo paso, se procesan todos los archivos de las curvas de brillo con el programa en FORTRAN llamado har20001 para realizar los cambios requeridos. Este programa además de hacer lo mismo que el descrito en la sección 3.6.2 (multiplicar por 1000 y enumerar la columna de la Señal TL; eliminar la columna de Temperatura y el encabezado del archivo), le resta a las curvas el valor Vs de offset correspondiente al paso TL que se utiliza en la lectura (véase tabla C.1).

```

C ***** har20001, archivo de salida: canal, altura*1000
      dimension T(500),G(500)
      character*15 entrada, salida
10     write(*,20)
20     format (1x,'nombre del archivo de datos:  ')
      read(*,25) entrada
25     format(a15)
27     open(unit=5,file=entrada,status='old')
      write(*,*) 'paso del amplificador (2,3,4)  '
      read(*,*) paso
      if(paso.eq.2) then
          resta=0.03980
      else
          if(paso.eq.3) then
              resta=0.05921
          else
              resta=0.07936
          endif
      endif
      write(*,30)
30     format (1x,'nombres del archivo de salida:  ')
      read(*,25) salida
      open(unit=6,file=salida,status='new')
      do 40 i=1,13
          read(5,25) a
40     continue
80     read(5,*) (g(l), t(l), l=1,200)
85     write(6,90) 200
          factor=1000
          do 87 ll=1,200
              gg=g(ll)
              g1=gg-resta
              if(g1.lt.0) then
                  g1=0
              else
                  g1=g1
              endif
          
```



```

write(6,100) ll,g1*factor
87 continue
90 format (5x,i3)
100 format (5x,i3,5x,f8.2)
250 stop
end

```

(Programa realizado por la Dra. Isabel Gamboa de Buen del ICN UNAM).

Finalmente, a los archivos procesados con el programa har20001, se les realiza la deconvolución de las curvas de brillo para separarlas en sus picos componentes, y se elaboran las curvas de respuesta como función de la dosis que se muestran en la sección 5.2.

2. Corrección por hardware.

Para evitar la corrección por software de todas las futuras lecturas realizadas con el sistema implantado, procedimiento que implica más trabajo y otra posible fuente de error, se determina eliminar el problema del aumento en una constante en las curvas de brillo con un circuito de "offset-null" que reste ese voltaje de "offset".

Después de un análisis del sistema implantado y de considerar que el valor V_h del offset que produce el Harshaw 2000 es de 8 mV (tabla C.1), se decide agregar un divisor de voltaje al circuito del amplificador usado para la Señal TL (sección 3.3); y que así se resten los 8mV de offset. En la figura C.2 tenemos el diagrama eléctrico del amplificador usado para la Señal TL, corregido con el divisor de voltaje.

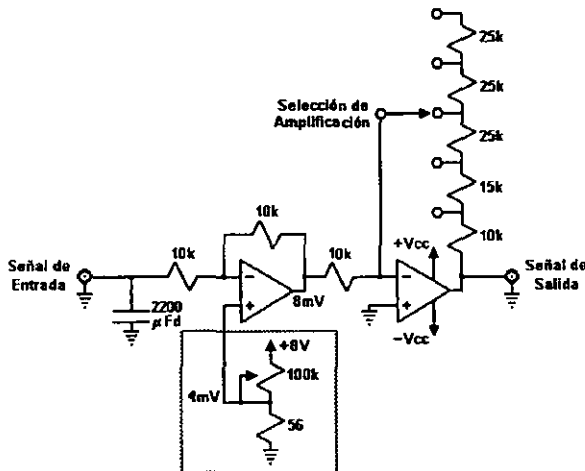
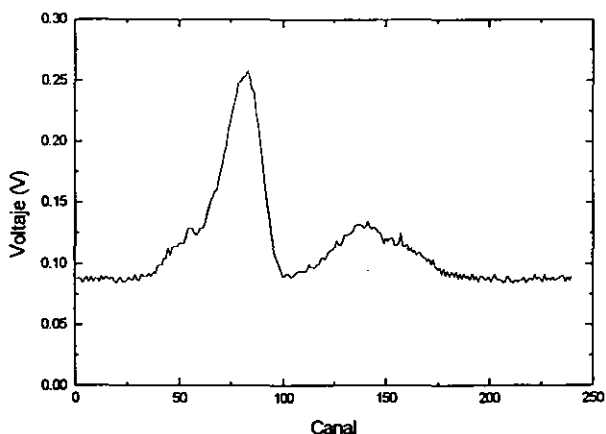
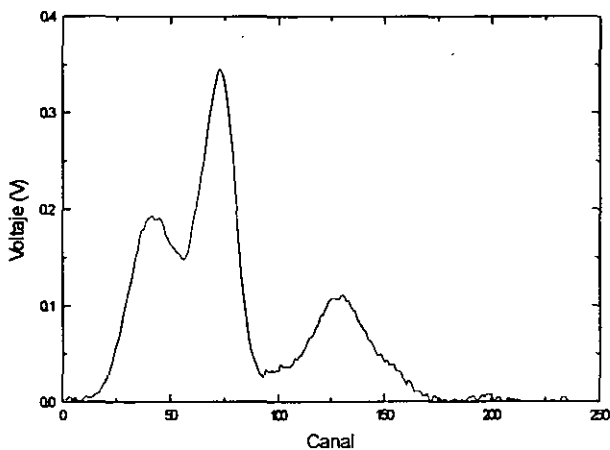


Figura C.2 Diagrama eléctrico del amplificador corregido para eliminar los 8mV del voltaje de offset que produce el Harshaw 2000.

Para comprobar el correcto funcionamiento del sistema compuesto por el lector Harshaw 2000, el amplificador corregido y la tarjeta Lab-PC+ se irradian unos cristales TLD-300 con rayos γ y de ^{60}Co y se obtienen las curvas de brillo correspondientes. En la figura C.3 tenemos ejemplos de curvas de brillo del TLD-300 obtenidas con: a) el amplificador sin corregir, b) el amplificador corregido. Nótese las posiciones de los ceros de las curvas.



a)



b)

Figura C.3 Curvas de brillo del TLD-300, irradiado a 1×10^{-3} Gy (100 mrad) con rayos γ y de ^{60}Co , obtenidas con: a) el amplificador sin corregir, b) el amplificador corregido.

Apéndice D. Glosario de términos de electrónica.

- **Amplificador operacional:** es el circuito lineal más versátil. Se llama amplificador operacional, ya que originalmente se diseñó para realizar operaciones matemáticas. Estos amplificadores amplifican la diferencia entre los voltajes o las señales que se aplican en sus dos entradas, teniendo una entrada inversora y otra no inversora.
- **DMA, Direct Access Memory:** proceso por el cual los dispositivos periféricos de una computadora pueden acceder directamente a los datos de la memoria principal del sistema sin pasar a través del microprocesador.
- **FIFO, First In - First Out:** secuencia de almacenamiento de datos utilizada en memorias donde el primer dato que entra, es el primer dato que sale.
- **Multiplexor:** dispositivo para transmitir a través de un único canal de salida varias señales diferentes de entrada. Para mantener la integridad de cada una de las señales a lo largo del canal, el multiplexor permite separarlas por tiempo, espacio o frecuencia.