

29. 117



# Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Química

DOSIMETRIA DE  
RADIACIONES IONIZANTES

TRABAJO ESCRITO

Que para obtener el Título de:  
QUIMICO FARMACEUTICO BIOLOGO

presenta

MARIA DEL ROCIO VARGAS OROZCO



TESIS CON  
FABRICA DE ORIGEN

1989



## **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 está 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.

# C O N T E N I D O

## DOSIMETRIA DE RADIACIONES IONIZANTES

	Hoja
1. INTRODUCCION. . . . .	1
2. RADIATIVIDAD NATURAL. . . . .	3
3. RADIATIVIDAD ARTIFICIAL. . . . .	6
4. PROPIEDADES DE LA RADIACION . . . . .	8
5. DOSIMETRIA DE LA RADIACION. . . . .	10
5.1 Unidades y términos. . . . .	10
6. NECESIDADES DE METODOS O SISTEMAS DOSIMETRICOS. . . . .	14
7. CLASIFICACION DE DOSIMETROS. . . . .	16
7.1 Dosímetros de referencia. . . . .	18
7.2 Dosímetros de rutina. . . . .	28
7.3 Dosímetros en estudio. . . . .	46
7.4 Dosímetros biológicos. . . . .	53
8. PROPIEDADES Y CARACTERISTICAS DESEABLES EN UN SISTEMA DOSIMETRICO . . . . .	54
9. RADIOLISIS DEL AGUA Y SOLUCIONES ACUOSAS. . . . .	55
10. RADIOLISIS EN SISTEMAS DOSIMETRICOS DE INTERES. . . . .	57
10.1 Radiólisis en el dosímetro de Fricke. . . . .	57
10.2 Radiólisis en el dosímetro cérico-ceroso. . . . .	58
10.3 Radiólisis en el dosímetro de ácido oxálico . . . . .	58
CONCLUSIONES. . . . .	59
 BIBLIOGRAFIA	

## 1. INTRODUCCION

Henri Becquerel, descubrió un fenómeno que hoy ejerce una profunda influencia en nuestras vidas. Becquerel estaba interesado en el estudio de la fluorescencia. En uno de sus experimentos colocó cristales de sulfato de potasio y uranio,  $K_2SO_4 \cdot (UO_2)SO_4 \cdot 2H_2O$ , sobre una placa fotográfica que estaba envuelta en papel negro. Expuso a la luz solar los cristales colocados sobre la película envuelta. El destello fluorescente emitido por el compuesto de uranio atravesó el papel oscuro e hizo que se oscureciera la parte de la película que estaba directamente debajo de la muestra de cristales. En un experimento de control, la luz solar por sí misma no causaba el ennegrecimiento de la película, ya que impedía su penetración la envoltura de papel oscuro. Esto demostró que había una diferencia en la energía de la luz solar y la correspondiente a la radiación fluorescente emitida por el compuesto de uranio. Puesto que había atravesado la envoltura, la radiación emitida por el uranio debía tener mayor energía.

Becquerel, convencido de que el oscurecimiento de la partícula se debía a la fluorescencia se preparó para continuar la investigación. En febrero de 1896 hizo los arreglos para otro experimento análogo; pero durante varios días el tiempo nublado del invierno en el norte de Francia impidió que brillara el sol y no pudo realizarse el experimento.

El 1° de marzo, Becquerel decidió usar nuevos grupos de compuestos de uranio y película fotográfica. Afortunadamente reveló las películas anteriores, las cuales había guardado junto con las muestras de cristales en el cajón de su escritorio. Becquerel esperaba que cuando mucho aparecería un débil oscurecimiento bajo el sitio donde habían estado los cristales, ya que la exposición a la iluminación del cuarto producía alguna fluorescencia. Para su sorpresa las manchas eran tan negras como si la luz solar hubiera actuado sobre el uranio. Becquerel interpretó correctamente ésto suponiendo que el uranio emitía espontáneamente rayos sin necesitar el estímulo de la luz exterior. Esta emisión era la causa del ennegrecimiento observado en la película fotográfica.

Repitió el experimento con otras sustancias que contenían uranio, tales como la pitchblenda, mineral que contiene óxido de uranio. Encontró que la pitchblenda afectaba las placas fotográficas aún más que las sales anteriores. Becquerel sospechó que la causa era algún elemento desconocido que estaba presente en el mineral y encargó a la señora Marie Sklodowska Curie, que tratara de aislar este elemento. Con su esposo Pierre, iniciaron la búsqueda que, en el uranio, mostraba el fenómeno de la emisión espontánea de radiaciones de alta energía. A este fenómeno le dió el nombre de radiactividad.(5)

La radiactividad es la propiedad de ciertos núclidos de emitir en forma espontánea partículas o radiación gamma

o de emitir rayos x después de la captura electrónica o de una fisión espontánea.

Las radiaciones pueden ser de los siguientes tipos:

	Prototipo
Partículas pesadas $\alpha, p, d, t$ con peso $> 1$ uma	$\alpha$
Partículas ligeras $\beta^-, \beta^+, e^-$ con peso $\ll 1$ uma	$\beta^-$
Electromagnética $x, \gamma$ con peso = 0	$\gamma$
Neutrones $n'$ con peso = 1 uma	

A su vez los neutrones se clasifican en forma arbitraria por su energía:

Lentos	0 - 1000 eV
Térmicos	$\sim$ 0.025 eV
Intermedios	1 - 500 Kev
Rápidos	0.5 - 10 Mev
Energéticos	$> 10$ Mev

Las equivalencias son las siguientes:

$$1 \text{ uma} = 931.140 \text{ Mev.}$$

$$1 \text{ uma} = 1.66043 \times 10^{-24} \text{ g.}$$

$$1 \text{ eV} = 1.07356 \times 10^{-9} \text{ uma.}$$

## 2. RADIOACTIVIDAD NATURAL

En 1898, Marie Curie, trabajando en París con su esposo Pierre, descubrió el elemento radio. Ambos encontraron

que los átomos de radio se comportaban de una manera extraordinariamente misteriosa.

Lleve un reloj cuya esfera contenga algo de radio, a un cuarto oscuro. Acostumbrados sus ojos a la oscuridad, enfoque una cifra de la esfera con una lente de gran aumento; verá diminutos destellos luminosos. Cada destello corresponde a la desintegración de los átomos. Aunque no se puede ver la radiación que sale del interior de cada átomo, puede obtenerse un destello visible en presencia de partículas de sulfuro de cinc que tienen la propiedad de brillar cuando reciben el impacto de la radiación emitida por el radio. En la pintura de la esfera del reloj se ha mezclado una sal de radio con sulfuro de cinc, y los átomos de este elemento se desintegran uno tras otro. (1)

Algunos núcleos atómicos experimentan un cambio repentino y espontáneo, liberando alguna de las tres energéticas partículas cargadas que van acompañadas por energía radiante en forma de penetrantes rayos gamma.

Como resultado de la emisión espontánea de partículas cargadas, los núcleos radiactivos se transforman o desintegran en núcleos de diferentes elementos.

Muchos de los materiales empleados en la construcción como el ladrillo, cada bloque de concreto, cada silla, cada mueble, el cemento, la cal, el yeso, la pintura, así como también cada objeto que nos rodea, tiene alguna forma de isótopo radiactivo natural.

El hombre, al igual que todos los seres, tiene en su organismo microcantidades de elementos radiactivos naturales. Así también el agua de lluvia y el agua potable.

En el año de 1900, W. Crookes observó que si una sal de uranio se precipitaba de una solución con carbonato de amonio y si se trataba de redissolver el precipitado formado con un exceso de reactivo, quedaba un residuo. Si este residuo se separaba de la solución por filtración se encontraba que era altamente radiactivo, en cambio, el líquido que contenía prácticamente todo el uranio, al evaporarlo a sequedad producía un residuo que tenía muy poca actividad. Al parecer la actividad observada no era causada por el uranio mismo, sino por otra sustancia separada de él. A la sustancia, altamente radiactiva se le dió el nombre de uranio equis, Ux, para distinguirlo del uranio original. La sustancia, resultó ser torio, Th-232, tan radiactivo como el uranio.

Por esa misma fecha, H. Becquerel observó que si el Ux y la solución o el residuo de ésta al evaporarla a sequedad se dejaban en reposo separadamente, por algún tiempo, la actividad del Ux disminuía, mientras que la del uranio aumentaba. Como dato complementario, el Th-232 tiene una vida media radiactiva de  $1.41 \times 10^{10}$  años.

E. Rutherford y F. Soddy, en 1902, observaron resultados semejantes con sales de torio, de donde se separaba otro

material altamente radiactivo al que llamaron torio equis, Thx, y en cambio la solución que quedaba y que contenía todo el torio tenía muy poca actividad. Después de varios días, notaron que el Thx (Ra-224 con una T1/2 de 3.64 d) iba perdiendo su actividad, mientras que el Th que había servido para obtener el Thx la iba "recuperando". Concluyeron después de hacer varios estudios que el crecimiento y el decaimiento radiactivo, eran eventos simultáneos.

### 3. RADIATIVIDAD ARTIFICIAL

Ernest Rutherford fue el primero que logró un cambio nuclear en el laboratorio, en 1919, al disparar "proyectiles atómicos" a los átomos de nitrógeno 14. Los átomos que servían de blanco capturaron a los "proyectiles" y se convirtieron en átomos de otros elementos.

Existen más de 300 núclidos naturales, la mayoría de los cuales son estables. A pesar de que algunos de los núclidos radiactivos se encuentran en la naturaleza, muchos más han sido preparados por transmutación nuclear. La radiactividad artificial fue descubierta en 1934 por los científicos Frederic e Irene Joliot-Curie, mientras estudiaban el efecto de las partículas alfa sobre núclidos de elementos ligeros.

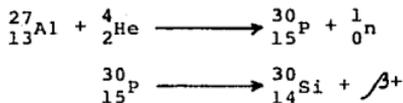
Quando elementos como el boro, magnesio y aluminio

fueron bombardeados con partículas alfa del polonio, se produjeron protones o neutrones, tal como se esperaba de las reacciones nucleares alfa-protón y alfa-neutrón. Además de esas partículas fueron observados los electrones positivos o positrones ( $\beta^+$ ) en una reacción del tipo siguiente:



Se bombardeó nitruro de boro (BN) con partículas alfa durante varios minutos y se calentó con sosa cáustica para liberar todo el nitrógeno como  $\text{NH}_3$  gaseoso. Se encontró que el amoníaco contenía toda la actividad, por lo tanto, el boro había cambiado a un isótopo radiactivo del nitrógeno con la anterior reacción.

Cuando se irradió un blanco de aluminio con partículas alfa y se disolvió en ácido clorhídrico,  $\text{HCl}$ , se liberó un gas conocido como fosfina,  $\text{PH}_3$ , mientras que el aluminio remanente permanecía en solución. Posteriormente la solución fué evaporada a sequedad y en el residuo se probó actividad de  $\beta^+$ , y no fue encontrada, en cambio, el gas  $\text{PH}_3$  sí tenía la actividad del  $\beta^+$ . La reacción nuclear fué la siguiente:



En la que un blanco de Al-27 se irradió con partículas alfa y después se disolvió en  $\text{HCl}$  y se formó P-30 y éste

por decaimiento radiactivo ( $T_{1/2} = 2.5$  minutos) emitiendo  $\beta^+$  pasó a Si-30.

Todas estas pruebas confirmaron la primera evidencia química definitiva de la transformación de un elemento en otro, al identificar químicamente al núcleo producto; además de la determinación de partículas que fueron detectadas en una cámara de nube y por la deflexión en un campo magnético.

En 1937 se conocían 88 elementos. En ese año, se creó el tecnecio ( $Z=43$ ) mediante una transmutación nuclear. En menos de una década, se prepararon de igual manera otros tres elementos sintéticos e identificados por los químicos para llenar los huecos en la tabla periódica. Así el francio ( $Z=87$ ) siguió en 1939, el astatino ( $Z=85$ ) en 1940 y el prometio ( $Z=61$ ) en 1945. Más allá del uranio ( $Z=92$ ), se han creado otros doce elementos nuevos llamados transuránicos.

#### 4. PROPIEDADES DE LA RADIACION

La materia es radiactiva cuando los núcleos atómicos emiten partículas subnucleares, o radiación electromagnética característica, sin masa ni carga, teniendo lugar un intercambio de energía al mismo tiempo.

La radiactividad es el proceso de degradación por el

cual los núcleos emiten partículas o rayos, perdiendo masa o solamente energía, y convirtiéndose en algún otro elemento en el primer caso o el mismo elemento en otro estado de energía en el segundo.

Los estudios con campos eléctricos mostraron que las sustancias radiactivas emitían tres diferentes clases de "rayos". Unos rayos eran desviados ligeramente hacia un lado del campo eléctrico. Recibieron el nombre de rayos alfa ( $\alpha$ ). Otros lo desviaban más intensamente, pero hacia el lado opuesto y se denominaron rayos beta ( $\beta$ ). Los terceros no eran desviados y se les llamó rayos gamma ( $\gamma$ ).

Becquerel demostró que los rayos beta eran partículas negativas idénticas por su carga y masa a los electrones que constituían los rayos catódicos y las emisiones fotoeléctricas. Rutherford, demostró que los rayos alfa eran partículas cargadas positivamente con una masa mayor que la del átomo de hidrógeno. Como se había encontrado que el gas helio estaba presente en los depósitos minerales de sustancias radiactivas, Rutherford pensó, y luego fué comprobado, que los rayos alfa estaban compuestos por iones positivos de helio. Estudiando la relación e/m en los rayos alfa, se demostró que dichos rayos consistían en iones de helio con doble carga,  $\text{He}^{+2}$ , cada uno con peso atómico relativo de 4.00 uma. Se encontró que los rayos gamma no tenían masa ni carga. Eran de naturaleza idéntica a los rayos

luminosos y rayos x, pero con mayor energía.

Las propiedades de la radiación son las siguientes:

Rdn. Símbolo	Energía Mev	Masa	Carga	Velocidad	Alcance en un medio		
		uma Aprox.	Signo	en el vacío Km/seg	Aire	Agua	Materia
$\alpha$	2-9	4	+2	20,000	2-8 cm	20-100 $\mu$	Empírico
$\beta^-$	0-3	0.0006	-1	290,000	0-10cm	0-1mm	Empírico
$\gamma$	0.01-10	0	0	$\sim$ 300,000	$\sim$ 100cm	$\sim$ 10cm	Exponencial
$\eta'$	0-14	1	0	$\sim$ 2	$\sim$ 100cm	$\sim$ 100cm	Exponencial

## 5. DOSIMETRIA DE LA RADIACION

La dosimetría es la medición de los cambios físicos, químicos o biológicos en un sistema que produce la energía depositada por la radiación en dicho sistema. La magnitud de los cambios dependerá en gran parte de la cantidad de radiación (dosis) absorbida.

### 5.1 UNIDADES Y TERMINOS.

La dosis absorbida está definida para cualquier tipo de radiación y cualquier medio absorbente.

La dosis absorbida tiene dos unidades especiales, que son el rad y el gray.

Rad. Unidad de dosis absorbida.

La dosis absorbida es la energía depositada en la materia por la radiación ionizante.

La dosis absorbida de cualquier radiación ionizante puede medirse en rads, un rad es la cantidad de energía absorbida por gramo de materia irradiada en cualquier medio cuando es igual a 100 erg/g.

El rad puede usarse sin tener en consideración el tipo de radiación o tipo de medio de absorción.

$$1 \text{ rad} = 6.24 \times 10^{13} \text{ ev/g}$$

$$100 \text{ rad} = 1 \text{ gray}$$

$$1 \text{ rad} = 0.01 \text{ gray (Gy)}.$$

La unidad de masa atómica unificada es de 1/12 de la masa del  ${}^{12}_6\text{C}$ .

$$1 \text{ ev} = 1.07356 \times 10^{-9} \text{ uma.}$$

$$1 \text{ uma} = 1.66043 \times 10^{-24} \text{ g}$$

ev. Es la energía adquirida por un electrón al ser acelerado por una diferencia de potencial de un volt.

$$1 \text{ Mev} = 10^6 \text{ ev}$$

El gray (Gy) la cantidad de radiación absorbida que disipa un julio de energía por kilogramo de material.

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg Sistema Internacional.}$$

Roentgen. Unidad de dosis de exposición.

La unidad de dosis de exposición es el roentgen, que se define como la intensidad de radiación x ó γ capaz de producir una unidad de cantidad de electricidad de cualquier

signo en 0.001293 g de aire, o sea en un  $\text{cm}^3$  de aire en condiciones normales de temperatura y presión, lo cual equivale a la absorción de 87.7 ergios por gramo de aire. Por definición, la unidad roentgen se limita a la radiación electromagnética (x ó  $\gamma$ ) y sirve para medir la intensidad de radiación en un espacio dado, pero no la dosis absorbida por un material cualquiera.

Desde 1975 la Oficina Internacional de Pesas y Medidas, ha propuesto como unidad de radiación el coulombio por kilogramo de aire, c/Kg, y se define como la intensidad de la radiación x ó  $\gamma$  capaz de producir un coulombio de carga electrostática de cualquier signo por kilogramo de aire su equivalencia con el roentgen, R, es la siguiente:

$$1 \text{ c/Kg} = 3876 \text{ R}$$

en donde:  $1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ c/Kg}$

Rem. Unidad de dosis equivalente hombre.

Es la unidad de dosis biológica. El rem proporciona la magnitud de una lesión biológica (de una clase dada) que podría resultar a consecuencia de una absorción de radiación igual a un rad.

El efecto biológico de una dosis de radiación dada es influenciado por el LET (transferencia lineal de energía en  $\text{Kev}/\mu$  en agua) de la radiación. Que es el valor de la pérdida de energía absorbida por una partícula ionizante al atravesar un medio absorbente. A mayor penetración de la radiación, tiene menor LET.

LET ↓	Rayos $\gamma$
	$e^-$ de alta energía
	Radiación $\beta^+$ . Rayos x
	p, d, $\alpha$
	Iones pesados. Fragmentos de fisión.

El efecto biológico relativo (EBR) de una radiación dada, es la relación de dosis absorbida (en rad de radiación  $\gamma$  de energía específica), con la dosis absorbida (en rad) de una radiación cualquiera necesaria para producir el mismo efecto biológico.

Factor de calidad de varios tipos de radiación:

Radiación	F.C.
x ó $\gamma$	1.0
$\beta^+$ , $\beta^-$ , $e^- > 0.03$ Mev	1.0
p, $^1_0n$ rápidos	10.0
$^1_0n$ lentos	5.0
$\alpha$ naturales	10.0 - 20.0

La dosis absorbida cuando es ponderada por el factor de calidad y otros factores modificantes, está dada en términos de dosis equivalente, representada por la letra H. La dosis equivalente en un punto de tejido está dada por la ecuación:

$$H = DQN$$

en donde: H = Dosis equivalente.  
D = Dosis absorbida.  
Q = Factor de calidad.

Los otros factores modificantes incluyen variaciones en la razón de dosis y dosis fraccionada; N tiene frecuentemente asignado el valor de 1 para todas las aplicaciones.

Las unidades especiales de dosis equivalente dependen de las unidades especiales de dosis absorbida que se empleen. Si la dosis absorbida está dada en rad, entonces la unidad de dosis equivalente es el rem. Si la dosis absorbida está dada en términos de gray, entonces la dosis equivalente es en términos de sievert

$$Sv = 1 \text{ J Kg}^{-1} = 100 \text{ rem.}$$

Entonces el rem, se define como el daño biológico causado cuando es absorbido un rad de radiación, la cual por definición tiene valor de 1. Por lo tanto, el daño biológico que provoque cualquier tipo de radiación, se mide multiplicando la dosis absorbida en rad por el valor específico EBR de este tipo de radiación, es decir:

$$\text{rem} = \text{rad} \times \text{EBR}$$

$$H (\text{Sv}) = D \times Q \times N$$

## 6. NECESIDADES DE METODOS O SISTEMAS DOSIMETRICOS.

El desarrollo del estudio de los radioisótopos ha sido posible con el paralelo desarrollo de la electrónica, la cual ha ido produciendo cada vez más perfectos instrumentos para detectar la radiactividad. Estos instrumentos propor-

cionan con variada eficiencia datos acerca del número de núcleos decayendo por unidad de tiempo en una muestra radiactiva y de la energía de las radiaciones absorbidas por el detector. Para ello es necesario que el tipo de detector sea escogido de acuerdo a las características de la radiación y su uso se realice en forma apropiada.

El conocimiento de las técnicas adecuadas para detectar las radiaciones y obtener una buena medida de su número por unidad de tiempo y de su energía, constituye un punto principal en el estudio de los radioisótopos, porque sólo a través de esta detección radiactiva pueden llegar a establecerse sus características y ser usados en aplicaciones científicas o industriales como las que siguen:

- a. Síntesis de productos químicos.
- b. Industria del petróleo (Cracking. Gasolina).
- c. Industria de los plásticos (Materiales nuevos. Mejoramiento de propiedades de los ya existentes. Madera-plástico.)
- d. Problemas químicos relacionados con la preservación de alimentos (aspectos biológicos, esterilización, etc.)
- e. Problemas técnicos relacionados con la esterilización (accesorios médico-quirúrgicos. Sueros. Microbiología. Anticonceptivos).
- f. Problemas químicos con la esterilización de aguas de desecho (Descontaminación. Productos no degradables, plantas de tratamiento de aguas).

g. Descontaminación de productos farmacéuticos (vacunas, medicinas).

## 7. CLASIFICACION DE DOSIMETROS

Con el propósito de correlacionar los cambios biológicos, químicos o físicos que ocurren en un sistema expuesto a la radiación ionizante, es necesario conocer la magnitud de la dosis recibida por el sistema. Por ello, se han desarrollado diversos métodos de dosimetría, unos de carácter primario o absolutos y otros secundarios o relativos.

Los métodos absolutos o primarios emplean la determinación directa de la dosis de exposición o de la dosis absorbida, es decir, determinan la energía absorbida de la radiación en el sistema por calorimetría, por la ionización producida por un gas o por la carga transportada por un haz de partículas cargadas de energía conocida.

Un gran número de sistemas, tanto físicos como biológicos y químicos se emplean para la dosimetría secundaria o relativa en los cuales la respuesta a la radiación absorbida se conoce por comparación con dosímetros primarios o absolutos. En particular, los sistemas químicos se han desarrollado extensamente con resultados satisfactorios.

Otra clasificación para la dosimetría es la de conside-

rarla dividida en dosimetría de referencia y dosimetría de rutina.

Los dosímetros de referencia son sistemas estandar cuya lectura puede medir el producto químico debido a la radiación en soluciones patrón fácilmente reproducibles de un laboratorio a otro.

Los dosímetros de rutina, tienen que ser de fácil manejo y con una respuesta que sea fácilmente medible. Necesitan calibrarse contra un sistema de referencia en términos de efectos de radiación medible como función de la dosis absorbida en el material deseado, y aunque no puede tenerse una buena precisión y reproducibilidad de respuesta a la radiación como con los dosímetros de referencia, son mucho más prácticos y versátiles para uso continuo, lo que hace que sean usados e investigados en mayor número que los demás sistemas.

Dosímetros de referencia:

Cámara de ionización.

Dosímetro de Fricke.

Calorímetro.

Dosímetros de rutina:

Dosímetros químicos.

Dosímetros a base de plásticos.

Dosímetros de termoluminiscencia (TLD).

Dosímetros de película.

## 7.1 DOSIMETROS DE REFERENCIA.

CAMARA DE IONIZACION. La medición por ionización consiste en la interacción de los diferentes tipos de radiación con la materia. Un método para detectarla consiste en la recolección de los iones formados y transporte posterior en circuitos eléctricos. La característica principal de estos instrumentos es el sistema de dos electrodos separados por un gas, en el cual la radiación incidente produce una ionización y un circuito a través del cual pasa una diferencia de potencial entre los electrodos para atraer hacia ellos los iones y generar una corriente o descarga de los electrodos que se mide por medio de dispositivos adecuados.

La cantidad medida de ese modo, es la exposición, de la cual se puede calcular la dosis absorbida, la composición del medio y la energía o el espectro de energía de la radiación.

Existen dos tipos de dosímetros personales de cámara de ionización, uno es conocido como dosímetro de bolsillo de lectura directa y el otro es una cámara de bolsillo del tipo condensado el cual requiere de un accesorio para efectuar las lecturas.(8) Estos dosímetros se han diseñado de tal manera que los niveles de exposición puedan ser leídos en cualquier momento ya sea por el usuario o por cualquier

persona designada para eso. Estos dosímetros tienen la forma de una pluma fuente grande y se pegan a la ropa.

Los dosímetros de lectura directa contienen dos electrodos centrales, uno de los cuales está fijo, el otro electrodo es un resorte de fibra de cuarzo el cual está libre para moverse, pero ambos unidos en forma de U. Las dos fibras están fundidas juntas en los extremos de la U y el dosímetro tiene una lente enfocada en el extremo opuesto de la fibra móvil. El dosímetro se carga con una fuente externa, con un voltaje lo suficientemente alto para colocar la fibra móvil al punto cero de la escala. La presencia de radiación produce entonces ionización que neutraliza la carga y permite a la fibra móvil regresar hacia la fibra fija a una distancia proporcional a la cantidad de radiación absorbida. La fibra de cuarzo genera una sombra en la escala, la cual es calibrada en unidades de exposición. De aquí que el usuario puede determinar inmediatamente la exposición, estos dosímetros son de utilidad en la medición de la exposición total, son resistentes a los golpes de la actividad humana normal. Su sensibilidad puede hacerse de tal manera que 100 miliroentgen producirán alrededor de la mitad de la deflexión total.

Estos dosímetros se cargan a alrededor de 150V para llevar la fibra de cuarzo a cero de la escala. La cámara de ionización se mantiene a potencial cero y el marco de

metal y las fibras de cuarzo se cargan al potencial del cargador, tanto las fibras como el marco de metal se repelen por tener el mismo potencial.

Dosímetros típicos tienen límites de 0-200 mR, 0-500 mR, 0-5 R, 0-50 R. Si el dosímetro es golpeado o sacudido puede ocasionar que se descargue e indicará una lectura más alta de la que debería ser.

La cámara de bolsillo tipo condensador tiene un alambre central y un electrodo cilíndrico aislado con una pared de baquelita. Por medio de una unidad de carga externa se coloca una carga en el centro del electrodo. Los iones formados en la cámara reducen la carga en una cantidad proporcional a la exposición de la radiación. Las funciones realizadas por la fibra de cuarzo y el mecanismo de escala están en una unidad externa. Consecuentemente la cámara se debe leer con un lector cargador separado.

La ventaja de la cámara de bolsillo tipo condensador sobre la de lectura directa es que son de menor precio.

DOSIMETRO DE FRICKE. Este sistema pertenece a la categoría de dosímetros químicos, pero debido a la mayor aceptación por su alta precisión y confiabilidad se considera como dosímetro de referencia y se utiliza como medio de calibración para otros dosímetros.

Se basa en el proceso de oxidación de los iones ferrosos

de una solución ácida de sulfato ferroso a iones férricos (sal) por la influencia de la radiación.



El dosímetro ofrece una precisión de 1-2% para medición de dosis absoluta. El límite de este sistema es de 3-40 Krad (30-400 Gy).

Composición química:

$\text{FeSO}_4$  ó  $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$  ..... 0.001 M

$\text{NaCl}$  ..... 0.001 M

$\text{H}_2\text{SO}_4$  ..... 0.8 N

Los mejores resultados se obtienen con las concentraciones de las soluciones entre  $10^{-3}$  y  $10^{-4}\text{M}$ , concentraciones menores (abajo de  $2 \times 10^{-5}\text{M}$ ) dan rendimientos bajos.

Los máximos rendimientos reproducibles se obtienen usando sales de Fe en  $\text{H}_2\text{SO}_4$  en la región de 0.2 a 1.5 N (generalmente 0.8 N) para hacer el sistema como una medición independiente de la longitud de onda. Los rendimientos disminuyen si se usa más diluido el ácido.

Se ha encontrado evidencia de que el rendimiento disminuye hasta un 25% cuando las exposiciones son mayores a valores de 1000 roentgen/min.

Aunque los rendimientos no cambian notablemente con la variación de la temperatura de los sistemas entre 0 y  $5^\circ\text{C}$  durante la irradiación, el coeficiente de extinción (coeficiente de extinción molar =  $2174 \text{ l/cm} \times \text{mol}$ ) en el

análisis espectrofotométrico de iones  $Fe^{+++}$  con el pico de absorción de 304 nm tiene una dependencia de la temperatura que da respuesta variable con menores cambios de temperatura ambiente.

La reducción de la concentración de  $O_2$  abajo de niveles críticos causa una reducción en el rendimiento. Durante la irradiación, el oxígeno disuelto es quemado. Por ejemplo, cuando el sistema es irradiado en contenedores cerrados equilibrados con aire, el rendimiento es lineal con dosis de 50 Krad hasta 200 Krad si se equilibra con oxígeno puro.

MEDICION DE DOSIS. La determinación de la concentración de ión férrico puede realizarse por medio de una titulación potenciométrica con dicromato de potasio o sulfato cérico; otro método más conveniente, es medir directamente en un espectrofotómetro a una longitud de onda de 305 nm.

La ecuación para calcularse es

$$D = \left[ \frac{\Delta A N}{\rho G \epsilon d} \right] \frac{b}{k}$$

en donde:

$D$  = la dosis absorbida en rad (o su equivalente en Gy)

$\Delta A$  = La diferencia de absorbancia (305nm a 25°C)

$A = (\Delta A_i - \Delta A_o)$ ,  $A_i$  y  $A_o$  son las absorbancias de las soluciones irradiada y no irradiada respectivamente.

$N = 6.0225 \times 10^{23} \text{ g mol}^{-1}$  (número de Avogadro)

$\rho = 1.024 \text{ g/cm}^3 = 1.024 \times 10^{-3} \text{ Kg/m}^3$  (densidad de la solución dosimétrica).

$d = 1 \text{ cm} = 0.01 \text{ m}$  (longitud óptica de la celda)

$b = 1.602 \times 10^{14} \text{ rad g ev}^{-1} \text{ 1 Gy JKg}^{-1}$  (factor de conversión de energía).

$k = 10^3 \text{ cm}^3 \text{ l}^{-1} = 1$  (factor de conversión de volumen)

$G = 15.6 \times 10^{-2} \text{ ev}^{-1}$  (rendimiento radioquímico de la formación de iones  $\text{Fe}^{3+}$ )

$\epsilon = 2195 \text{ l mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$  (coeficiente de extinción molar a 305 nm y 25°C).

Sustituyendo los valores anteriores en la ecuación de dosis y efectuando las operaciones correspondientes se tiene:

$$D = 2.75 \times 10^4 \Delta A \text{ rad } \text{ ó } D = 2.75 \times 10^2 \Delta A \text{ Gy}$$

El valor del coeficiente de extinción molar varía con la temperatura. Puede corregirse con la fórmula:

$$\epsilon_{\text{Fe}^{3+}, 25^\circ\text{C}} = \frac{\epsilon_{\text{Fe}^{3+}, t^\circ\text{C}}}{1 + \epsilon(t-25)}$$

en donde  $\epsilon$  para 25°C y  $t^\circ\text{C}$  son los valores de los coeficientes de extinción molar a esas temperaturas, y a 25°C  $\epsilon$  tiene un valor de  $0.007^\circ\text{C}^{-1}$ .

Si las medidas de absorbancia no se realizan a 25°C, debe hacerse una corrección de la temperatura.

La temperatura de irradiación puede determinarse utilizando, un termopar o termistor durante la irradiación.

La ecuación final queda:

$$D = \frac{2.75 \times 10^4 \Delta A}{1 + 0.007 (t-25)} \text{ en rad.}$$

$$D = \frac{2.75 \times 10^2 \Delta A}{1 + 0.007 (t-25)} \text{ en Gy.}$$

**CALORIMETROS.** Se basan principalmente en la medición del incremento de la temperatura de un material expuesto a un haz de radiación. La cantidad de energía absorbida depende de las propiedades del campo de la radiación y de las propiedades del material. Las cantidades de calor relacionadas en estas interacciones proporcionan información de la energía depositada en el material absorbente, así como también del campo de radiación.

El material puede ser tal, que toda la energía absorbida se convierta en calor; también es necesario que este material sea buen conductor de calor (como el grafito por ejemplo, que es el más empleado).

Si el material es de tamaño suficiente para absorber completamente la radiación, la magnitud del incremento de la temperatura se relaciona directamente a la densidad del flujo de energía o intensidad del haz. La cantidad de calor generada en el material es extremadamente pequeña, por lo cual el método calorimétrico no es propio para uso rutinario, sin embargo, puesto que los resultados se obtienen en unida-

des absolutas de energía, el método da una importante comparación con otros métodos no absolutos.

Los calorímetros pueden dividirse en dos categorías:<sup>(6)</sup>

1. Calorímetros de absorción total de energía, diseñados para absorber toda la energía emitida por la fuente de radiación. Por ejemplo, para mediciones absolutas de la actividad, o bien para determinar la intensidad del haz de partículas.

2. Dosímetros calorimétricos. Realizados para medir la energía de radiación absorbida por una muestra de tamaño y composición conocida. En esta categoría se encuentran los dosímetros más usados y conocidos.

Un calorímetro está formado fundamentalmente de tres partes: cuerpo absorbente, medio circundante y camisa.

Como el calor ocurre en el cuerpo absorbente, es mejor denominar a esta parte del sistema como cuerpo térmicamente activo (TAB). El medio circundante funciona como medio de transferencia de calor entre el cuerpo y la camisa que es la parte del sistema que intercambia energía calorífica directamente con el cuerpo absorbente por transferencia de calor a través del medio circundante.

Van unidos a estas tres partes fundamentales, el siguiente equipo: Equipo para medición de la temperatura.

Equipo de control de temperatura.

Equipo de calibración.

**EQUIPO PARA MEDICION DE LA TEMPERATURA.** Como es necesario detectar los cambios de temperatura fuera del campo de radiación, se hace uso de detectores de temperatura como termopares y termómetros de resistencia.

**EQUIPO DE CONTROL DE TEMPERATURA.** Hay dos formas de control de temperatura. La primera es para mantener constante la temperatura de la camisa y la segunda, para igualar la temperatura del cuerpo de la camisa.

**EQUIPO DE CALIBRACION.** Para poder calcular la dosis o razón de dosis, es necesario conocer el factor de proporcionalidad entre el efecto de la temperatura medida y la energía de entrada. Este factor de proporcionalidad depende del método que se utilice y de los detalles de construcción del calorímetro.

Se puede calcular el factor de calibración experimentalmente, por la medición de la temperatura contra tiempo por un procedimiento de calibración.

**CALORIMETRO ADIABATICO.** Se describe este sistema como una muestra de uno de los diferentes tipos de calorímetros. Se representa en la Fig. 1.

El cuerpo del calorímetro consta de un bulbo de vidrio lleno de agua y sellado con cera. Termocoples (C) y un calibrador de calor (G) están suspendidos en el líquido.

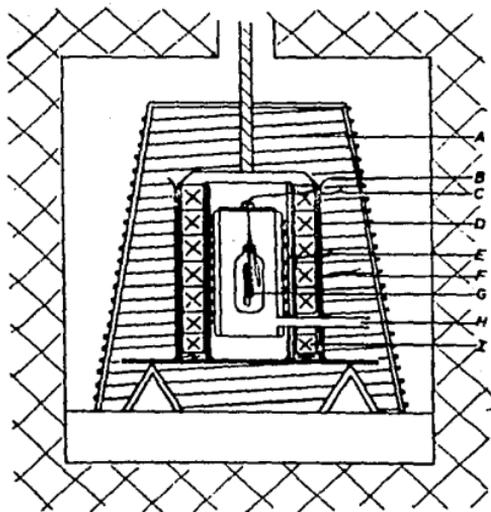


Fig. 1. Calorímetro adiabático para calibración de dosímetros químicos en una fuente de  $^{60}\text{Co}$ . (A) cavidad del calentador, (B) posicionador de la fuente de latón, (C) termopar de agua, (D) calentador de chaqueta, (E) termopar de chaqueta, (F) cavidad de termopar, (G) filamento calibrador de calor, (H) sistema de vacío, e (I) cobalto en pared de cilindro de latón.

El bulbo se coloca dentro de una nueva chaqueta de latón alrededor de la cual está un segundo calentador. El espacio entre el cuerpo y la chaqueta es evacuado alrededor de 1 mm Hg. Para disminuir la pérdida de calor de la radiación, la superficie externa del bulbo puede estar revestida con plata.

El control adiabático, se mantiene manualmente, ajustando el calor de la chaqueta, para mantener una diferencia de temperatura de cero.

Para estos calorímetros, los valores de dosis son del orden de 0.1 - 1.0 Mrad/hr fueron medidos con un error experimental de alrededor de 2% (Lazo et al., 1954)

## 7.2 DOSIMETROS DE RUTINA.

La energía absorbida en los dosímetros de rutina se determina a partir de la medida cuantitativa de un cambio producido en el sistema químico usado como dosímetro y que permite una respuesta reproducible de la radiación que sea lo suficientemente estable para conocer la dosis o rango de dosis para varias ocasiones después de la irradiación, sin necesidad de hacer correcciones por inestabilidad.

DOSIMETROS QUIMICOS. La dosimetría química se ha desarrollado extensamente con resultados satisfactorios; a lo

largo de los últimos avances en energía nuclear y el uso de fuentes de radiación más potentes.

La radiación ionizante puede ocasionar una variedad de diferentes reacciones químicas en sistemas apropiados escogidos. En la dosimetría química, la energía absorbida de la radiación es determinada a partir de la medida cuantitativa de un cambio producido en el sistema químico usado como dosímetro.

Como ya se mencionó anteriormente, el dosímetro químico usado más frecuentemente es el de Fricke por sus sistemas estandarizados exactos; que consiste en una solución acuosa de sulfato ferroso 0.001 M, NaCl - 0.001 M y ácido sulfúrico 0.8 N. La solución es saturada con aire disuelto que por lo tanto contiene oxígeno. Normalmente se irradia en un vidrio o celda de sílica. Dosis desde 5000 a 50 000 rads (50 - 500 Gy), de rayos x ó  $\gamma$  ó electrones rápidos producen suficiente oxidación de hierro ferroso a férrico para permitir que la cantidad de hierro férrico sea estimada en un medidor de absorción a longitud de onda de 304 nm o mejor a 224 nm. Utilizando celdas de absorción largas, dosis tan bajas como 300 rads, se pueden calcular. Se pueden calcular hasta 200 000 rads (2 KGy) utilizando una solución saturada con oxígeno y 0.004 M en hierro ferroso. El rendimiento es independiente de la velocidad de la dosis entre 6 y  $10^{10}$  rad/min (0.06 -  $10^8$  Gy/min).

En ausencia de radiación, ocurre una oxidación lenta, pero esto puede ser corregido por y para medir la diferencia entre una solución irradiada y otra almacenada, sin irradiar, por el mismo tiempo. (2)

Para rayos gamma ó x sobre 200 Kev o electrones rápidos hasta 30 Mev (o partículas  $\beta$ ) el valor G de la reacción es 15.6 o sea que 15.6 átomos de hierro férrico son producidos para una energía absorbida de 100 ev. Para energías más bajas el LET de los electrones liberados en el agua es más alto y para rayos x de 8 Kev  $G = 13.4$ . Con iones pesados el LET es más grande y se ha encontrado que para deuterones rápidos, protones o partículas alfa son obtenidos valores más bajos de G, dependiendo del LET, por ejemplo para partículas alfa de  $Po^{210}$   $G = 5.1$ .

La selección de un dosímetro químico depende de los factores siguientes:

- a. Tipo y características de la radiación que se emplee, ésto es, electrones, rayos gamma, neutrones o partículas alfa; de la dosis, de la razón de dosis, LET y energía.
- b. Tipo y características de la muestra problema, ésto es, líquido, gas, sólido, en forma de partículas, polvo, tejido, vidrio o plástico.
- c. Diseño de irradiación, o sea, tipo de contenedor, temperatura de irradiación y presión.

d. Materiales. Reactivos e instrumental analítico con que se disponga.

DOSIMETROS QUIMICO-ACUOSOS. Los cambios químicos dependen de varios parámetros:

- a. Concentración del soluto.
- b. Energía y tipo de radiación.
- c. Dosis absorbida.

Y en menor grado:

- d. Razón de dosis.
- e. pH de la solución.
- f. Temperatura.
- g. Presión.

En los dosímetros químico-acuosos es muy importante la radiólisis del agua, que es el proceso que se lleva a cabo cuando se hace incidir radiación sobre el agua.

El principio de los dosímetros líquidos es que contienen una sustancia química disuelta, de características conocidas, la cual puede reaccionar con una o varias especies de los productos radiolíticos primarios del líquido, aún cuando sus concentraciones sean bajas; la medida de los productos finales formados o el cambio en las concentraciones de la sustancia inicial o bien de alguna de sus propiedades, da la información necesaria para obtener los valores de la dosis deseada.

DOSIMETROS A BASE DE AZUCARES. Rotación óptica. Cuando ciertos azúcares químicamente puros son expuestos a la radiación gamma, su rotación emite luz polarizada debido a los átomos de carbono asimétricos en su estructura molecular. Como la cantidad de rotación depende de la intensidad de radiación a la cual se exponen los compuestos, los cambios en la actividad óptica de las soluciones químicas pueden dar una medida de la dosis absorbida.

Para el cálculo de la dosis, se construye una curva de calibración de dosis Vs cambio de rotación óptica. Estos dosímetros dan una respuesta lineal a dosis muy altas (K Gy), proporcionando mediciones de dosis más altas que con el método de Fricke.

Dosímetros a base de azúcares. Formación de aldehído. Se basan en la determinación del aldehído malónico (malonaldehído M.N.) formado por la irradiación de ...

a. Sucrosa ( $C_{12}H_{22}O_{11}$ ) P.M. 342.30

b. Fructosa ( $C_6H_{12}O_6$ ) P.M. 180.66

c. Arabinosa ( $C_5H_{10}O_5$ ) P.M. 150.13

El M.A. se determina espectrofotométricamente después de formar el complejo MA-TBA (ácido tiobarbitúrico), a una longitud de onda de 540 nm. Las lecturas obtenidas se comparan con una curva de calibración ya trazada y se obtienen así directamente las concentraciones repecticas de M.A.

DOSIMETROS A BASE DE CRISTALES. Tipos apropiados de cristal pueden ser irradiados y los iones que se producen pueden ser atrapados en sitios de impureza en un enrejado de cristal, produciendo cambios en color, variaciones en la densidad y en el coeficiente de absorción óptica.

Estos cristales se pueden usar como dosímetros, uno de los mejores en un cristal de borosilicato activado con cobalto en pequeños bloques pulidos de 1.5 mm de grueso.

Después de la irradiación la absorción se puede medir en un medidor de absorción fotométrico adecuado, la densidad óptica incrementa linealmente con dosis sobre el rango de  $10^3$ - $10^8$  rads ( $10$ - $10^6$ Gy). El oscurecimiento desaparece cerca del 2% en las primeras 24 horas. Se puede obtener una exactitud de cerca del 2% en medición de dosis.

Un cristal de fosfato activado por plata tiene un desempeño un poco inferior ya que hay hasta un 20% de desvanecimiento en las primeras 24 horas después de la exposición.

También los plásticos se pueden usar y en este caso el blanqueamiento del color durante la irradiación puede ser medido.

DOSIMETRIA A BASE DE COLORANTES RADIOCROMICOS. El método empleado está basado en la producción de una coloración intensa permanente de soluciones incoloras de ciertos

precursores colorantes cuando son expuestos a la radiación, usualmente leuco-trifenilmetanos como los cianuros, carbinoles, verde malaquita, fuscina nueva, etc. Pueden utilizarse también geles, películas delgadas o papel impregnado.

La dosis se deriva de la medición espectrofotométrica del incremento en la absorbancia inducida por la radiación a una longitud de onda que varía con el colorante y solvente seleccionado.

Estos sistemas son sensibles a la luz ultravioleta incluyendo la luz del sol y la humedad puede afectar la respuesta.

Las mediciones apropiadas para utilizar estos dosímetros están en un límite de  $10^3 - 10^6$  rad ( $10 - 10^4$  Gy) con una precisión de  $\pm 3\%$ .

Los dosímetros de referencia y de rutina más comunes se indican en la tabla 1.

**DOSIMETRIA A BASE DE PLASTICOS.** Los dosímetros plásticos muestran varios tipos de cambios por la irradiación. La mayor parte de los cambios dependen de la dosis total.

Entre los cambios producidos a los dosímetros plásticos, inducidos por la radiación se tienen: cambios en la apariencia, químicos, físicos y en las propiedades mecánicas.

Los cambios en la apariencia son efectos temporales y permanentes en el color y formación de burbujas.

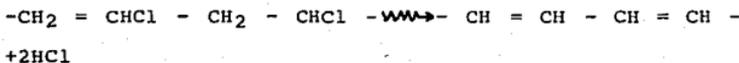
Los cambios químicos incluyen formación de dobles enlaces, formación de cloro, rompimiento de ligaduras, degradación con oxidación, polimerización, depolimerización y evolución de gas.

Los cambios físicos incluyen efectos en la viscosidad, solubilidad, conductividad, fluorescencia y cristalinidad. Los cambios en la cristalinidad se miden por difracción de rayos x, medición de la densidad, calor de difusión y otras propiedades.

Las propiedades mecánicas que cambian son la fuerza de tensión, módulo de elasticidad, elongación, flexibilidad.

El cambio de color ha tenido mucha utilidad en dosimetría, según algunos autores, el cambio de color se debe a los electrones o radicales libres atrapados y según otros se debe al halógeno que juega un papel muy importante en el proceso de degradación, por el uso de los radicales libres o el ataque de los enlaces dobles que ocasionan un rompimiento de la cadena principal.

DOSIMETRO DE CLORURO DE POLIVINILO (PVC)  $-RCH = CH_2$  ó  $CH_2 = CH-R$ . El proceso consiste en la coloración de películas de PVC expuestas a la radiación. La irradiación induce una deshidroclorinación y el producto final es la formación de enlaces dobles conjugados, o sea:



Cambia a color verde, amarillo, ámbar y café rojizo, dependiendo de la dosis. La coloración es proporcional a la dosis absorbida en un intervalo de  $10^5$  -  $10^7$  rad ( $10^3$  -  $10^5$  Gy).

La determinación de la dosis se lleva a cabo espectrofotométricamente, midiendo la densidad óptica de las películas irradiadas y comparando los resultados con una curva de calibración. Su precisión es del 10%. Se usan películas de PVC directamente, cortando las muestras al tamaño que se desee.

Se someten las películas a un tratamiento térmico que desarrolla las reacciones inducidas hasta una condición estable.

El tratamiento es a  $80^{\circ}\text{C}$  (  $\pm 5$  ) durante 30 min. que debe llevarse a cabo dentro de las tres horas siguientes a la irradiación.

La densidad óptica se mide a 395 nm, usando como referencia una película no irradiada de PVC.

Los valores anteriores, tanto para el tratamiento como para la medición de la densidad óptica, son para el PVC de la marca Bakelite. En general para cada tipo especial de película la selección de la longitud de onda se hace a partir del espectro de la película.

Las películas comerciales de PVC son copolímeros de cloruro de vinilo y acetato de vinilo (90% de PVC y 10%

de PVA). Las películas que contienen plastificantes no son adecuadas para dosimetría ya que estos aditivos absorben energía suficiente como para inhibir la coloración.

DOSIMETRO DE POLIMETIL-METACRILATO (PMMA). Es un material plástico transparente utilizado usualmente en forma laminar y conocido comercialmente como perspex, lucita o plexiglas. Cambia de color y de absorción a la luz ultravioleta. Los cambios de color son, amarillo que persiste aún después de calentamiento prolongado a 80°C y rojizo que se decolora a 80°C.

También es posible la dosimetría por cambio en la viscosidad del polimetil-metacrilato. Una curva de calibración del recíproco de la viscosidad Vs dosis da una línea recta.

Los dosímetros plásticos a base de PMMA.

Perspex rojo para dosis entre 0.5-4.0 Mrad (5-40 KGy)

Perspex ámbar para dosis entre 0.5-4.0 Mrad (5-40 KGy)

Perspex claro para dosis entre 0.5-5.0 Mrad (5-50 KGy)

Su uso se basa en los cambios de coloración que presentan al ser irradiados. En general el material se oscurece y éste puede ser medido en términos de densidad óptica.

Para lograr resultados reproducibles, deben seguirse en orden las siguientes indicaciones:

- El material debe limpiarse cuidadosamente antes de su uso.

- Debe evitarse la exposición a la luz durante y después de la irradiación.

- Evitar tocar o rayar la superficie del dosímetro.

- Las mediciones deben realizarse poco tiempo después de la irradiación.

- El dosímetro no debe usarse para períodos de irradiación muy prolongados, especialmente a temperaturas mayores a 35°C a menos que se tomen precauciones para prevenir la difusión del oxígeno, lo que opaca la muestra.

- Se deben evitar temperaturas mayores de 60°C después de la irradiación.

- La irradiación debe efectuarse bajo condiciones de equilibrio electrónico.

Este dosímetro muestra un pico de absorción en la región ultravioleta entre 260 y 345 nm. La longitud de onda adecuada depende de la composición del polímero y del tipo espectrofotométrico de U.V. que se utilice.

Para calcular la dosis se calibra el incremento de la absorbancia contra la dosis medida en algún dosímetro primario obteniendo la curva de calibración. Este incremento se corrige para el espesor de cada muestra de PMMA (medido en un micrómetro), para que los resultados correspondan a un espesor estándar. La ecuación de corrección es:

$$A_{\text{corr.}} = \frac{(\Delta A) \text{ Espesor real}}{\text{Espesor medido}}$$

La dosis absorbida por una muestra se deriva de la curva de calibración. La precisión es de 2%.

Los dosímetros pueden almacenarse por años sin cambios apreciables en su sensibilidad antes de la irradiación.

Los límites de dosis absorbida dependen del espesor de la lámina de PMMA, por ejemplo, un espesor de 3mm puede usarse para medir dosis absorbidas de 0.1 - 2.5 Mrad (1 - 25 KGy). Si se reduce el espesor, el límite superior de dosis absorbida puede incrementarse hasta 5 Mrad (50 KGy)

DOSIMETRIA POR TERMOLUMINISCENCIA.(8) Algunos cristales poseen una propiedad conocida como termoluminiscencia (TL). Cuando esos cristales se exponen a la radiación ionizante, muchos de los electrones libres dentro del cristal son excitados y atrapados en imperfecciones dentro del cristal llamadas "trampas" o centros de sensibilidad. Los cristales expuestos pueden ser guardados a temperatura ambiente durante largos periodos sin que un número significativo escape de las trampas. Sin embargo, cuando los materiales son calentados a altas temperaturas, los electrones atrapados escapan y pierden su exceso de energía con la emisión de luz visible. Como la cantidad de luz liberada por el cristal calentado es proporcional a la energía o a la razón de dosis de radiación absorbida dentro del cristal, el fenómeno de TL puede

emplearse en dosimetría de radiaciones.

Los cristales más comunmente usados por sus propiedades termoluminiscentes son el fluoruro de litio ( $\text{LiF}$ ), fluoruro de calcio ( $\text{CaF}_2$ ), fluoruro de calcio activado con manganeso ( $\text{CaF}_2:\text{Mn}$ ), sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ) y borato de litio ( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ). El lector de termoluminiscencia (TLD) que tiene un aditamento de calentamiento controlado es empleado para determinar cuanta luz se emite durante el calentamiento del material del dosímetro. Los datos de las intensidades de la luz en función de la temperatura, trazados en papel milimétrico dan una figura llamada curva de luminiscencia. La curva normalmente tiene varios picos a diferentes temperaturas. El área bajo cada pico puede usarse como una medida de la dosis recibida por el TLD.

Una vez que el TLD ha sido irradiado y leído en el lector de TLD puede ser regenerado y reusado. La regeneración es un proceso de calentamiento lento que vacía completamente las trampas y restaura el cristal a su estado original. En otras palabras se enfría lentamente permitiéndole liberar la tensión en su estructura cuando se abate la temperatura, la estructura cristalina no se daña y está lista para usarse nuevamente.

El más común de los materiales de TLD, es el  $\text{LiF}$ , que tiene un número atómico efectivo muy cerca al del tejido del músculo humano y es considerado frecuentemente como

"tejido equivalente". Tiene un límite de respuesta de 1 mrad a  $10^5$  rad ( $10$  KGy  $10^3$  Gy) y poca dependencia de la energía de la radiación. Debe ser recalibrado después de cada uso.

Los materiales termoluminiscentes pueden usarse en forma de polvo suelto, encapsulados en plástico, en bulbos de vidrio sellado o en forma de listón.

Los TLD se usan como dosímetros corporales totales, así como también para manos. Se utilizan también en aplicaciones radiológicas para verificar el plan de tratamiento.

Las ventajas de los TLD son que son muy pequeños, bastante resistentes y esencialmente inafectables por las variables ambientales, se pueden reutilizar además de que se pueden leer fácilmente ya que no requieren más que un horno y un fotómetro. Los TLD se pueden usar durante muchas semanas y no pierden cantidades apreciables de energía almacenada.

La mayor limitación del TLD es que una vez que ha sido calentado y enfriado, la información se pierde, en cambio el dosímetro de película retiene la información.

El dosímetro TLD-albedo es ampliamente usado para monitoreo de neutrones. El dosímetro se lleva cercano al cuerpo entre la cadera y el cuello. En esta posición los neutrones incidentes o térmicos (lentos) son medidos directamente por el dosímetro. Por otra parte, los neutrones rápidos

incidentes, entran a cuerpo y son moderados o frenados. Los neutrones frenados son después reflejados hacia el dosímetro, en donde interaccionan con los gránulos termoluminiscentes. (El término "albedo" se refiere a la reflexión y regreso hacia el dosímetro de los neutrones frenados).

DOSIMETRIA POR LUMINISCENCIA. Entre los sistemas más prometedores para medir altas dosis de radiación está la degradación luminiscente.

Existen compuestos "luminóforos" que presentan un decremento en su luminiscencia al ser expuestos a la radiación. Para usar este efecto como dosímetro, se observa la luminiscencia pos-irradiación en la frecuencia de la luz visible o cercana a la ultravioleta y se leen a través de un filtro de 442 nm.

Un sistema consiste en pequeñas obleas (círculos) de antraceno y p-quaterfenilo para dosis de  $5 \times 10^5$  a  $5 \times 10^9$  rad ( $5 \times 10^3$  -  $5 \times 10^7$  Gy) con una exactitud de  $\pm 10\%$ .

Otro sistema a base de quinina en agua  $10^{-5}$  -  $10^{-8}$  moles/l para dosis de rayos x de  $(5 - 2) \times 10^2$  rad (5-2 Gy).

DOSIMETROS DE PELICULA. Los principios físicos de la dosimetría de la radiación ionizante por emulsiones fotográficas están relacionados con el proceso fundamental de

la fotografía, el mecanismo de la transmisión de energía de la radiación a la emulsión y la respuesta de la emulsión a la radiación.

El material sensitivo conocido como emulsión consiste de pequeños cristales de halogenuro de plata en gelatina. Cuando la radiación es absorbida en la emulsión de la película, algunos de los granos de haluro de plata se alteran. Estos granos alterados responden entonces diferente a los agentes reductores conocidos como reveladores. Es decir, aquellos granos afectados por la radiación son reducidos a plata metálica. Este estado revelable producido en la emulsión por acción de la radiación es llamado "imagen latente". El tratamiento químico de la película produce los centros de imagen latente al ser reducidos a plata metálica que aparece a la vista como un ennegrecimiento de la película. La sensibilidad de la película se define como la cantidad de obscurecimiento producida por una exposición a una radiación específica. El espesor de la emulsión (que se extiende a través de una delgada película de plástico o de una placa de vidrio) puede variar de 10 a 2000  $\mu\text{m}$  dependiendo de la sensibilidad que se desea. Mientras más gruesa es la emulsión, más sensible es la película.

El grado de obscuridad o sea la densidad óptica de la placa revelada es proporcional a la exposición de la película. La relación entre la exposición y la densidad

óptica está determinada por la comparación con películas expuestas a cantidades conocidas de radiación de la misma energía para lo cual se usa un densitómetro, su precisión es de  $\pm 5\%$ .

En el caso de la dosimetría personal las películas fotográficas son incorporadas a las llamadas placas dosimétricas o gafetes. Los gafetes modernos están diseñados para que la radiación pueda llegar a la película en forma directa a través de una ventana abierta a través de filtros. Los filtros son discos hechos de metales como plomo, estaño, cobre, cadmio, plata o aluminio y se emplean para distinguir entre diferentes energías de radiación. Por ejemplo, filtros delgados de un material de número Z bajo, como el aluminio, pueden usarse para distinguir entre rayos gamma y partículas beta de alta energía. Otros filtros metálicos pueden ayudar a discriminar los diferentes componentes de un espectro de rayos gamma. La mayor parte de los dosímetros de película detendrán las partículas beta con energía menor de 150 Kev.

Una vez que la película ha sido procesada, es leída e interpretada. Para producir la probabilidad de error en la lectura de la película, se procesan películas no expuestas de control y procesadas junto con las películas expuestas. Las películas no expuestas producen una densidad u obscurecimiento durante el proceso conocido como base niebla. Al procesar los dosímetros control junto con los

dosímetros expuestos, es posible restar la base niebla de los dosímetros expuestos.

Como el calor afecta la placa, el dosímetro no deberá estar expuesto a la luz solar o almacenado en un lugar caluroso. La imagen latente empieza a decaer después de un tiempo, así un pedazo de placa no deberá usarse por más de 1 ó 2 meses antes de ser revelado. La práctica general indica que los dosímetros de placa deben reemplazarse quincenal o mensualmente. Cuando los niveles de radiación son bajos, un cambio de placa por mes es suficiente.

Los dosímetros de película no son dosímetros absolutos y por tanto deben ser calibrados contra una fuente conocida para relacionar la densidad de la película con la exposición. Los gafetes con película estandar no están diseñados para responder en alguna forma a los neutrones. Sin embargo la película de emulsión de trayectoria nuclear (NTE), que es más gruesa que la normal, puede usarse como monitor de neutrones.

La respuesta de la película a los neutrones depende en general de las interacciones de los neutrones con los átomos de la emulsión. Dependiendo del tipo de interacciones de los neutrones incidentes con la película, se producen partículas cargadas que a su vez interaccionan con los átomos de la película de emulsión NTE para formar trayectorias visibles. Las huellas pueden ser contadas y relacionadas

con las dosis neutrónicas.

### 7.3 DOSIMETROS EN ESTUDIO

Existen gran cantidad de sistemas dosimétricos de los cuales, muchos aún se están investigando y otros son poco empleados por sus características muy particulares.

En la Tabla No. 2 se mencionan algunos sistemas de importancia.

A continuación se cita un sistema dosimétrico a base de azul de metileno que aún no ha sido comercializado (4).

El sistema dosimétrico consiste de una solución diluida de azul de metileno envasados en ampolletas de vidrio sellados a flama gas-oxígeno bajo condiciones atmosféricas normales. Esta solución es decolorada por efecto de la radiación ionizante.

Una de las causas por la que ocurre la decoloración de la solución por el efecto de la radiación, es la reducción del azul de metileno y formación de su leuco-base, la cual es incolora.

ELECCION DE LA SOLUCION DOSIMETRICA. Las condiciones de precisión de un aparato que no tiene amplificación, obligan a que las lecturas de densidad óptica o absorbancia queden comprendidas entre 0.15 y 0.80. Tomando esto en

TABLA NO. 1

DOSIMETROS DE REFERENCIA

<u>SISTEMA DOSIMETRICO</u>	<u>METODO ANALITICO RECOMENDADO</u>	<u>LIMITES DE UTILIDAD (Kgy)</u>	<u>TIPO DE RADIACION MEDIDA</u>	<u>REPRODUCIBILIDAD <math>\pm(+)</math></u>
Sulfato ferroso	Espectrofotométrico	0.04 - 0.40	Y	1
Sulfato cérico	Espectrofotométrico	1 - 50	Y	1
Calorímetro	Sensor térmico	(s) 0.2 KGy/min	$\alpha, \gamma$	1 - 1
Calorímetro	Sensor térmico	(l) 0.2 KGy/min	Y	2

DOSIMETROS DE RUTINA

Sulfato cérico	Potenciométrico	1 - 50	Y	2
Etolol clorobenceno	Oscilométrico	1 - 400	Y	4
Sacáridos	Lioluminiscencia	$10^{-3} - 8 \times 10^{-2}$	Y	2 - 5
Aminoácidos	Emisión de luz	0.01 - 5	Y	3 - 5
Polímeros	Emisión de luz	$2 > 40$	$\alpha, \gamma$	?
Perspex claro	Espectrofotométrico	$1 > 50$	Y	1 - 2
Perspex rojo	Espectrofotométrico	5 - 50	Y	1 - 2
Perspex ámbar	Espectrofotométrico	1 - 20	Y	1 - 2
Alanina	RPE	$10^{-3} - 10^2$	$\alpha, \gamma$	1 - 2
Película radiocrómica	Espectrofotométrico	1 - 100	$\alpha, \gamma$	2
	ó Densitométrico			10
Triacet, de celulosa	Espectrofotométrico	0 - 15	$\alpha, \gamma$	1
	ó Densitométrico		Y	
Cristales	Espectrofotométrico	$10^{-8} - 10$	$\alpha, \gamma$	5
	ó Densitométrico			
Borato de litio	TLD	0.1 - 100	? Y	?
D <sup>+</sup> Glucosa	Polarimétrico	$10 - 5 \times 10^3$	$\alpha, \gamma$	?

TABLA NO. 2

<u>SISTEMA</u>	<u>EFEECTO DE LA RADIACION</u>	<u>LECTURA</u>	<u>RANGO DE DOSIS</u>
Vidriosy cristales	Desarrollo de color	Densitometría	$10^4 - 10^8$ rad
		Espectrofotometría	$10^2 - 10^6$ Gy
	Fotoluminiscencia	Fluorimetría	$1 - 1.5 \times 10^4$ rad $10^{-2} - 1.5 \times 10^2$ Gy
Aminoácidos y Polímeros	Cambio en el espectro RPE	RPE	$10^3 - 10^9$ rad $10 - 10^7$ Gy
Polímeros	Degradación en el peso molecular. Pérdida e incremento de viscosidad.	Viscosimetría	$10^4 - 10^7$ rad $10^2 - 10^5$ Gy
Reducción o activación de quelatos metálicos (Co <sup>+3</sup> EDTA)	Reducción a Co <sup>+2</sup>	Espectrofotometría de U.V.	0.01 - 10 Mrad 0.1 - 100 KGy
Azúcares	Cambio en la actividad óptica.	Rotación óptica	$1 - 5 \times 10^8$ rad $10^{-2} - 5 \times 10^6$ Gy

cuenta, la solución dosimétrica más adecuada será aquella cuya concentración diera una lectura de absorbancia cercana al límite superior, es decir  $2.5 \times 10^{-5}$  M para 290 nm y  $1.3 \times 10^{-5}$  para 661 nm. Sin embargo, el empleo de dos soluciones dosimétricas implicaría el doble de tiempo en la preparación e irradiación de las muestras. Una opción podría ser el empleo de la solución de mayor concentración, y después de haber efectuado la lectura de densidad óptica a 290 nm, hacer una dilución para obtener una lectura adecuada a 661 nm, pero esto provocaría un aumento en el error experimental y en el tiempo de análisis de la muestra.

Por lo anteriormente expuesto, se decidió en la elección de una solución de concentración intermedia ( $2.0 \times 10^{-5}$ M) y efectuar ambas lecturas de densidad óptica en forma directa.

#### PREPARACION E IRRADIACION DE LA SOLUCION DOSIMETRICA.

Pesar 0.00711 g de azul de metileno, disolver en agua tridestilada y aforar a un litro en un matraz volumétrico. El matraz con la solución puede colocarse bajo ultrasonido durante 10 minutos para asegurar la completa disolución.

Tomar alícuotas de 8 ml y colocarlas en ampollitas de vidrio de 10 ml de capacidad previamente tratadas en  $\text{HNO}_3$  1:1 caliente durante 24 horas y perfectamente enjuagadas con agua tridestilada.

Las ampolletas con la solución dosimétrica fueron selladas a flama gas-oxígeno y almacenadas en la obscuridad a temperatura ambiente hasta el momento de ser irradiadas.

Todas las irradiaciones se hicieron procurando conservar la misma geometría en series de 4 ampolletas para cada dosis suministrada.

CURVAS DE CALIBRACION. CALCULO DE LA DOSIS. Las figuras 2 y 3 muestran las curvas de calibración D.O. Vs Dosis de irradiación a 290 y 661 nm respectivamente. Estas curvas se obtuvieron tomando el valor promedio de densidad óptica de cuatro muestras en función de la dosis suministrada entre 0 y 90 krad (0 - 900 Gy).

La dosis absorbida puede determinarse directamente a partir de las curvas de calibración, o bien, a partir de las ecuaciones siguientes.

$$D = - \frac{1}{0.0171} \ln \frac{D.O. (290 \text{ nm})}{0.55268}$$

$$D = - \frac{1}{0.0336} \ln \frac{D.O. (661 \text{ nm})}{1.2094}$$

PRECISION. Para el cálculo de la precisión en la determinación de la dosis absorbida, se irradiaron 6 muestras durante un tiempo de 30 minutos (aproximadamente una dosis de 30 krad), se determinó la densidad óptica a 290 y 661

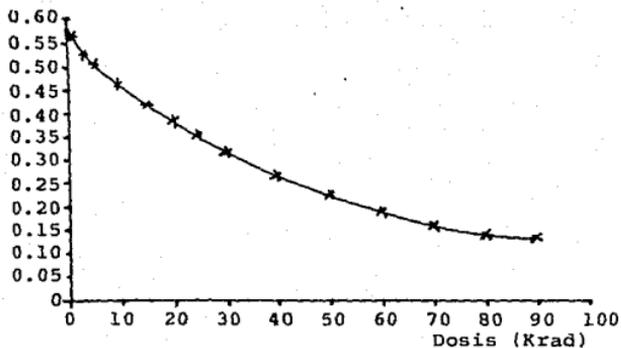


Fig. 2 Curva de calibración D.O. Vs Dosis para azul de metileno  $2 \times 10^{-5}M$  en agua tri-distilada.  $\lambda = 290$  nm.

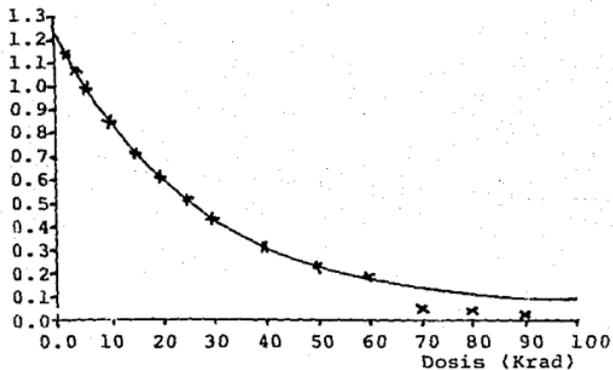


Fig. 3 Curva de calibración D.O. Vs Dosis para azul de metileno  $2 \times 10^{-5}M$  en agua tri-distilada.  $\lambda = 661$  nm.

nm, y a partir de las ecuaciones correspondientes se calculó la dosis absorbida. Los resultados aparecen en la tabla número 3.

Para un nivel de significación = 0.05, las precisiones obtenidas fueron:

$$\% P(290 \text{ nm}) = \pm 6.6$$

$$\% P(661 \text{ nm}) = \pm 1.6$$

**TABLA NO. 3**

**CALCULO DE LA DOSIS ABSORBIDA A PARTIR  
DE LAS ECUACIONES DE LAS CURVAS DE CALIBRACION\***

MUESTRA	D.O. 290 nm	DOSIS (krad)	D.O. 661 nm	DOSIS (krad)
1	0.328	30.5126	0.456	29.0294
2	0.342	28.0683	0.463	28.5760
3	0.317	32.5074	0.447	29.6227
4	0.314	33.0635	0.445	29.7561
5	0.335	29.2776	0.458	28.8991
6	0.333	29.6278	0.457	28.9642

\* Las muestras se irradiaron durante 30 minutos (dosis aproximada de 30 krad).

## 7.4 DOSIMETROS BIOLÓGICOS.

En la esterilización por irradiación, el método dosimétrico más directo es el monitoreo microbiológico.

Los microorganismos se irradian junto con el producto. Después de la irradiación el número de sobrevivientes capaces de reproducirse sirven para evaluar la dosis. En el cuadro siguiente se presentan algunos ejemplos de dosímetros microbiológicos.

SISTEMA DOSIMETRICO	DOSIS MAYOR A LA QUE TODOS LOS CULTIVOS SON + ( $10^6$ rad ó $10^4$ Gy)	DOSIS MENOR A LA QUE TODOS LOS CULTIVOS SON - ( $10^6$ rad ó $10^4$ Gy)
Clostridium tetani	1.3	1.8
Especies de bacilos	1.0	1.6
Especies de bacilos	0.8	1.6
Clostridium sporogenes	1.1	1.4
Bacilo subtilis	1.1	1.3
Clostridium sporogenes	0.8	1.2
Especies de bacilos	0.8	1.2
Especies de bacilos	0.8	1.1
Especies de bacilos	0.7	1.0
Bacilo coagulans	0.4	0.8
Especies de bacilos	0.3	0.5

RESISTENCIA DE ESPORAS BACTERIANAS. A cada disco de película plástica de 1cm de diámetro se le aplica 0.1 ml de suspensión, conteniendo  $5 \times 10^5$  microorganismos por ml. Después de la irradiación el microorganismo se cultiva en placas de agar-gel, si no aparecen colonias, el resultado indica esterilización.

DOSIMETRIA CON SOLUCIONES ENZIMATICAS. Se ha intentado utilizar la desaparición de la actividad enzimática en soluciones irradiadas de muchas enzimas, pero los resultados hasta la fecha, no han sido completamente satisfactorios.

#### B. PROPIEDADES Y CARACTERISTICAS DESEABLES

##### EN UN SISTEMA DOSIMETRICO

- A) Respuesta lineal con la dosis.
- B) Respuesta lineal e independiente de la razón de dosis.
- C) Respuesta independiente de la energía de la radiación.
- D) Respuesta independiente de las condiciones de irradiación (temperatura, presión, humedad).
- E) Cubrir límites de  $10 - 10^8$  rad ( $1-10^6$  Gy) o mayores.

F) Estable químicamente antes y después de la irradiación.

G) Deberá ser medible con precisión en un instrumento o con técnicas adecuadas confiables.

H) Reproducible en  $\pm 2\%$  y más, generalmente  $\pm 5\%$ .

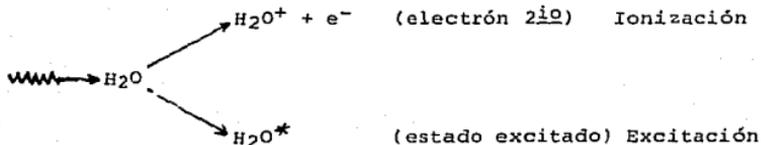
I) Económico y fácil de obtener.

J) Sencillo y seguro en su manipulación.

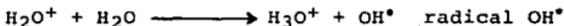
### 9. RADIOLISIS DEL AGUA Y SOLUCIONES ACUOSAS

El proceso de la radiólisis (cuando se hace incidir radiación sobre el agua) se realiza en tres etapas:

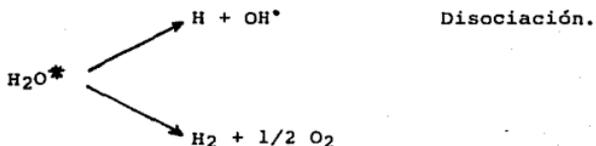
1a. ETAPA. ETAPA FISICA: En un intervalo de tiempo de  $10^{-16}$  a  $10^{-17}$  seg. una partícula con energía muy alta, atraviesa una molécula de agua produciendo preferentemente ionización o excitación, formando moléculas excitadas además de iones.



2a. ETAPA. ETAPA FISICO-QUIMICA: En un intervalo de  $10^{-14}$  seg. se efectúan reacciones ión-molécula. El agua iónica reacciona con otra molécula de agua formando un radical libre.



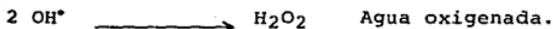
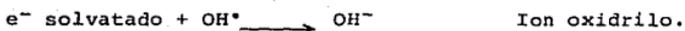
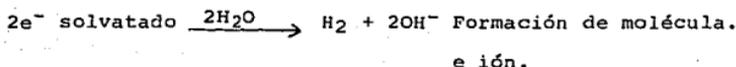
En este periodo parte de la energía electrónica se transforma en vibracional. La molécula de agua excitada se disocia, ya sea dando origen a un radical libre o perdiendo energía.



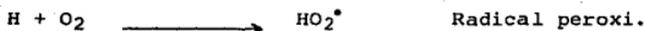
Los electrones secundarios ( $e^-$ ) pierden su energía cinética en exceso muy rápidamente y se reducen a electrones termales. En aproximadamente  $10^{-11}$  seg. se lleva a cabo la formación del electrón solvatado (hidratado) como resultado de la reacción del electrón secundario.



3a. ETAPA. ETAPA QUIMICA: En un periodo de tiempo entre  $10^{-7}$  a  $10^{-10}$  seg. existe una competencia entre los radicales para combinarse y formar moléculas, los cuales se difunden dentro de la trayectoria. Las reacciones son:

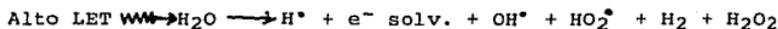


Existe además un proceso de recombinación del agua:



$$\text{Rendimiento radiactivo} = G = \frac{\text{No. de moléculas transformadas}}{100 \text{ eV absorbidos.}}$$

Radiólisis del agua a:



## 10. RADIOLISIS EN SISTEMAS DOSIMETRICOS DE INTERES

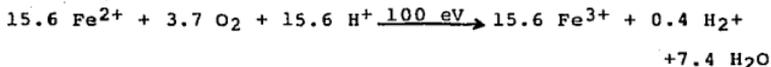
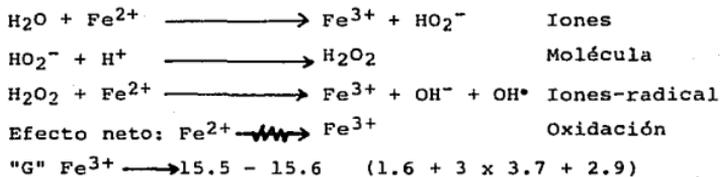
### 10.1 RADIOLISIS EN EL DOSIMETRO DE FRICKE:

Solución ferrosa en agua  $10^{-3} - 10^{-4} \text{ M (Fe}^{2+}\text{)}$

pH de la solución  $H_2SO_4 \text{ } 0.2 - 1.5 \text{ N}$

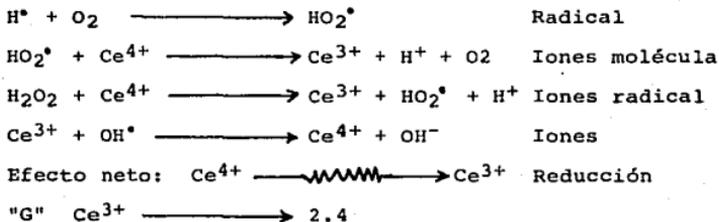
Proceso:



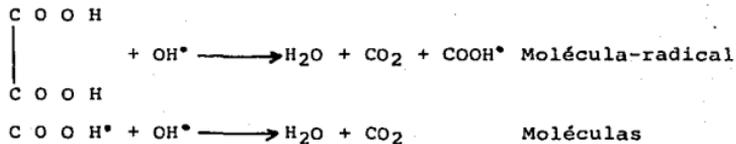


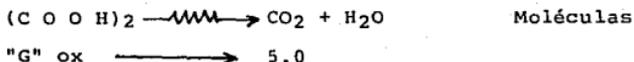
### 10.2 RADIOLISIS EN EL DOSIMETRO CERICO-CEROSO (SOLUCION ACUOSA).

Proceso:



### 10.3 RADIOLISIS EN EL DOSIMETRO DE ACIDO OXALICO (SOLUCION ACUOSA).





### CONCLUSIONES

En los últimos años varias decenas de nuevos sistemas dosimétricos han sido descubiertos y reportados con gran entusiasmo como una solución a muchos problemas de dosimetría. Muchos de éstos fueron innovaciones de otros que fueron descubiertos y estudiados muchos años antes.

El progreso de la dosimetría de alta dosis ha estado asociado a la expansión de los usos industriales de la radiación ionizante principalmente en el tratamiento de materiales para hospitales, de alimentos, en la esterilización industrial y en la tecnología química.

Futuras investigaciones sobre los efectos químicos de la radiación contribuirán adicionalmente al conocimiento fundamental de la absorción de la radiación y también orientarán al desarrollo de métodos químicos prácticos para la medición exacta de la radiación de rayos x, gamma, electrones acelerados y neutrones.

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

## BIBLIOGRAFIA

1. Brandwein P.F. La Materia sus Formas y sus Cambios. Publicaciones Cultural, S.A. México 1978.
2. Butement F.D.S. Dosimetría de la Radiación Ionizante e Instrumentación Asociada. (Curso). OIEA, CNEN, UNAM. México 1968.
3. Chávez M.C. Dosimetría de Radiaciones Ionizantes con Soluciones de Etanol-Clorobenceno. Tesis Profesional. Facultad de Química, UNAM. México 1983
4. Chávez M.C. Dosímetro a Base de Azul de Metileno. Tesis para obtener el título de Maestro en Ciencias Nucleares. Facultad de Química. UNAM, 1986.
5. Choppin. G.R.; Jaffe B. Química. Publicaciones Cultural, S.A. México 1976.
6. Holm, N.W. Bery, R.J. Manual on Radiation Dosimetry. Eds. Marcel Dekker. New York 1970.
7. Mc-Laughlin L.W. Topics in Radiation Dosimetry. Notas de Física. Vol. 4, No. 2. Instituto de Física UNAM. México 1981.
8. Noz E.M.; Maguire G.Q., Jr. Radiation Protection in the Radiologic and Health Sciences. Lea & Febriger. Philadelphia 1985.
9. Reyes L.J.; Moreno M.A.; Auxier J. Programa de Aplicaciones Industriales de la Radiación. CNEN e Instituto de Física, UNAM. Curso sobre Dosimetría de la Radiación Ionizante e Instrumentación Asociada. México 1970.
10. Zúñiga V.T. Sistemas Dosimétricos para Radiación Gamma a Base del Cambio de pH en Soluciones Acuosas de Monosacáridos. Tesis Profesional. Facultad de Química. UNAM, 1984.
11. Biomedical Dosimetry: Physical Aspects, Instrumentation Calibration. Proceedings of a Symposium. Paris, 1980.
12. Handbook of Radioactive Nuclides. Department of Radiology Homestead Hospital. The Chemical Rubber C.O. Pennsylvania 1969.
13. National and International Standardization of Radiation Dosimetry. Proceedings of a Symposium. Atlanta. International Atomic Energy Agency, Vienna. 1978.