

24. 39



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

DOSIMETRIA EN IRRADIADORES INDUSTRIALES
PARA CONTROL DE CALIDAD

Tesis Profesional

Que para obtener el Titulo de
LICENCIADO EN FISICA

p r e s e n t a

JESUS ORTA RENDON

México, D. F.

1983



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.

I N D I C E

INTRODUCCION		1
CAPITULO	I. INTERACCION DE LA RADIACION CON LA MATERIA	3
	- Interacción de la radiación con la materia	
	- Interacción de la radiación gamma con la materia	
	- Interacción de los rayos X con la materia	
	- Interacción de los electrones con la materia	
CAPITULO	II. FUENTES DE IRRADIACION E IRRADIADORES , SEGURIDAD RADIOLOGICA EN LA PRESERVACION DE ALIMENTOS Y LA ESTERILIZACION DE PRODUCTOS MEDICOS-FARMACEUTICOS.	15
	- Radioisótopos	
	- Irradiadores industriales y de laboratorio	
	- Transporte	
	- Diseño de una planta de irradiación	
	- Seguridad radiológica	
	- Dosímetros	
CAPITULO	III. USO DE PELICULAS DE CELOFAN COMO DOSIMETRO SECUNDARIO EN EL PROCESO DE IRRADIACION INDUSTRIAL	49
	- Antecedentes	
	- Materiales	
	- Características espectrofotométricas de los materiales	
	- Irradiación de películas de celofán azul	

CONCLUSIONES

58

BIBLIOGRAFIA

63

I N T R O D U C C I O N

La gran explosión demográfica que se ha presentado en el mundo durante las últimas décadas ha creado la urgente necesidad de aprovechar al máximo los productos alimenticios cosechados ó elaborados , los cuales sufren una merma considerable (contaminación , putrefacción , brotes de tubérculos , - etc.) desde el momento de su elaboración ó cosecha hasta el momento en que se consumen . Los productos médicos desechables requieren el empleo de un sistema que permita su esterilización sencilla , rápida y confiable .

Existen diferentes sistemas de esterilización algunos de ellos son : el cocimiento , el enfriamiento , el uso de gases y sustancias químicas . Dentro de los sistemas empleados últimamente se encuentra el uso de la energía nuclear que ha requerido la unificación de científicos en ramas como : química , biología , ingeniería y física .

Aunque la acción letal de las radiaciones sobre las células vivientes era conocida desde principios de siglo , fué necesario esperar hasta el fin de la segunda guerra mundial - para emprender estudios intensivos con objeto de aplicar las radiaciones en sus dosis adecuadas a la conservación de productos alimenticios , de medicamentos y productos desechables .

El desarrollo de las técnicas de irradiación en la esterilización estan ligadas al desarrollo de las investigaciones sobre los factores que influyen en la destrucción de los

microorganismos por las radiaciones ionizantes .

Los alimentos y medicamentos pueden ser irradiados con radiación gamma cuyo alto poder de penetración permite la esterilización de productos cuyo grosor sea grande . Otra solución consiste en irradiar al producto con electrones producidos por aceleradores pero existe un límite en estos casos por su pequeña penetración . Este inconveniente viene a ser una ventaja en el caso de la presencia de microorganismos en la superficie de los productos a tratar .

La aplicación de la irradiación en la preservación de alimentos constituye una técnica potencial que abre las puertas a una época en la cual , se procura mejorar el aprovechamiento de los productos alimenticios .

El propósito de este trabajo , se enfoca a desarrollar un dosímetro industrial con materiales nacionales útil en el control de calidad en la conservación de alimentos y esterilización de productos médico - farmacéuticos desechables .

En los capítulos I y II se tratarán los puntos más importantes de la irradiación de productos alimenticios y médicos.

I .- INTERACCION DE LA RADIACION CON LA MATERIA

En la preservación de alimentos y en la esterilización de productos desechables de uso médico - farmacéutico se emplean rayos gamma , rayos X y haces de electrones .

La interacción de la radiación con la materia se presentará brevemente a continuación para tener un conocimiento del aspecto físico de la irradiación .

INTERACCION DE LA RADIACION GAMMA CON LA MATERIA .- La radiación gamma se origina al pasar el núcleo de un estado energético E_i a uno E_f , donde el exceso de energía E_o se emite en forma de fotones de energía :

$$E_o = E_i - E_f \quad \text{--- ---(1)}$$

La variación de la intensidad de la radiación gamma mo no energética al atravesar un medio material de espesor Δx y de coeficiente de absorción γ es proporcional a la intensidad del haz de fotones incidente , es decir :

$$\frac{\Delta I}{\Delta x} \propto I \quad \therefore \quad \frac{\Delta I}{\Delta x} = I \gamma \quad \text{--- ---(2)}$$

donde γ es la constante de proporcionalidad .

En el límite , cuando $\Delta x \rightarrow 0$ se tiene :

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{\Delta x} \rightarrow \frac{dI}{dx} \quad \text{--- ---(3)}$$

$$\frac{dI}{dx} = -I \gamma \quad \therefore \quad \frac{dI}{I} = - dx \gamma \quad \text{--- ---(4)}$$

integrando se obtiene

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = \ln \frac{I}{I_0} = -\int_{x_0}^x \mu dx = -\mu(x - x_0) \Rightarrow \ln \frac{I}{I_0} = -\mu \Delta x$$

$$\therefore I = I_0 e^{-\mu \Delta x} \quad \text{----- (5)}$$

donde I_0 es la intensidad de la radiación gamma inicial ; la I es la intensidad del haz después de que parte del haz fué - absorbido y Δx es la longitud del material atravezado .

Debido a la naturaleza exponencial de la absorción de los rayos gamma no se tiene un alcance definido para éstos - como en el caso de las partículas alfa y beta , pero están ca racterizados por la atenuación del coeficiente de absorción . La intensidad del haz de fotones puede escribirse como :

$$I = h\nu \phi \quad \text{----- (6)}$$

donde $h\nu$ es la energía del fotón incidente ; ϕ es el número - de fotones que cruzan una unidad de área en una unidad de tiem po y es llamado flujo .

El coeficiente de absorción puede expresarse también - en términos del coeficiente másico de absorción μ , del coe ficiente atómico de absorción μ_a y del coeficiente electrónico de absorción , relacionadas por las siguientes expresiones :

$$\mu = Z \mu_a \quad \text{----- (7)}$$

$$\mu = N \mu_a / A = N Z \mu_a / A \quad \text{----- (8)}$$

$$\mu = \mu / \rho = N_a \mu_a / A = N Z \mu_a / A \quad \text{----- (9)}$$

donde Z es el número atómico del material absorbedor ; A es su peso atómico ; ρ es su densidad en g/cc y N es el número de Avogadro .

La interacción de la radiación gamma con la materia se realiza por los siguientes fenómenos :

EFEECTO FOTOELECTRICO .- Cuando un haz incide sobre la superfi cie de un material , los fotones son absorbidos por los elec-

trones del material . Si la energía suministrada E_0 es mayor que la función de trabajo de la superficie (E_a) del material el electrón será emitido con la energía E_k dada por :

$$E_k = E_0 - E_a \quad - - - - (10)$$

ahora como $E_0 = h\nu_0$ y $E_a = h\nu_a$ entonces $E_k = h (\nu_0 - \nu_a)$, por lo tanto si ν_0 es mayor que ν_a existe emisión . Este "efecto" presenta la propiedad de que la distribución de la energía de los electrones emitidos (fotoelectrones) es independiente de la intensidad de los fotones incidentes .

EFECTO COMPTON .- El efecto Compton se realizó al ceder parte de su energía un fotón incidente a un electrón libre (esta consideración se puede realizar para los electrones de un átomo , si la energía de amarre de los mismos es mucho menor que la energía del fotón incidente) , el resultado de la interacción es un fotón dispersado al ángulo ϕ y un electrón con energía cinética E y un ángulo de dispersión θ , como se puede observar en la figura 1 .

Las expresiones importantes dentro del efecto Compton se describen brevemente a continuación . La expresión de la variación de la longitud de onda que experimenta un fotón dispersado a un ángulo ϕ se obtiene a partir de la conservación de la cantidad de movimiento .

Las componentes verticales y horizontales de la cantidad de movimiento son :

$$\nu h / c = (\nu' h / c) \cos\phi + P \cos\theta \quad - - - - (11)$$

$$0 = (\nu' h / c) \sin\phi + (- P) \sin\theta \quad - - - - (12)$$

donde $h\nu$ es la energía del fotón incidente ; $h\nu'$ es la energía del fotón dispersado ; c es la velocidad de la luz y P la cantidad de movimiento del electrón .

Multiplicando las ecuaciones (11) y (12) por c , queda

$$h\nu = h\nu' \cos\phi + P_0 \cos\theta \quad \text{--- (13)}$$

$$0 = h\nu' \sin\phi - P_0 \sin\theta \quad \text{--- (14)}$$

elevando al cuadrado las expresiones y sumandolas queda

$$h^2\nu^2 - 2h\nu h\nu' \cos\phi + h^2\nu'^2 = (P_0)^2 \quad \text{--- (15)}$$

las expresiones para la energía total de una partícula son

$$E = T + m_0 c^2 \quad \text{--- (16)}$$

$$E = (m_0^2 c^4 + p^2 c^2)^{1/2} \quad \text{--- (17)}$$

igualando estas expresiones y desarrollando tenemos:

$$p^2 c^2 = h^2\nu^2 + h^2\nu'^2 - 2h\nu h\nu' + 2m_0 c^2 (h\nu - h\nu') \quad \text{--- (18)}$$

igualando las ecuaciones (15) y (18) tenemos

$$h^2\nu^2 - h\nu h\nu' \cos\phi + h^2\nu'^2 = h^2\nu^2 + h^2\nu'^2 - 2h\nu h\nu' + 2m_0 c^2 (h\nu - h\nu')$$

$$(h\nu - h\nu') 2m_0 c^2 = (h\nu + h\nu') (1 - \cos\phi) \quad \text{--- (19)}$$

$$m_0 c^2 (\nu - \nu') / h = (\nu + \nu') (1 - \cos\phi) \quad \text{--- (20)}$$

$$m_0 c \left(\left(\nu / c \right) - \left(\nu' / c \right) \right) / h = \left((\nu / c) + (\nu' / c) \right) (1 - \cos\phi) \quad \text{--- (21)}$$

como $\lambda = c/\nu$ tenemos, desarrollando la expresión anterior:

$$\lambda' - \lambda = (1 - \cos\phi) h / m_0 c \quad \text{--- (22)}$$

La ecuación 22 expresa la variación de la longitud de onda que experimenta un fotón dispersado a un ángulo ϕ . De la ecuación (19) podemos obtener la longitud de onda de Compton así:

$$m_0 c^2 (h\nu - h\nu') = h\nu h\nu' (1 - \cos\phi) \quad \text{--- (23)}$$

$$h\nu - h\nu' = h\nu h\nu' (1 - \cos\phi) / m_0 c^2 \quad \text{--- (24)}$$

de aquí podemos considerar a $\alpha = h\nu / m_0 c^2$, donde α es la razón entre la energía del fotón incidente y la energía del electrón considerado en reposo. A esta razón, se le llama "Longitud de onda Compton"

De la ecuación (19) se puede obtener la energía del electrón en función de la energía del fotón incidente y del án

gulo de dispersión del fotón

$$h\nu - h\nu' = \alpha h\nu' (1 - \cos \phi)$$
$$h\nu = h\nu' [1 + \alpha (1 - \cos \phi)] \quad \therefore$$

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \alpha (1 - \cos \phi)} \quad \text{--- (25)}$$

como la energía adquirida por el electrón es $E_e = -(h\nu - h\nu')$
entonces de (25);

$$E_e = h\nu \left[\frac{1}{1 + \alpha (1 - \cos \phi)} - 1 \right] \quad \text{--- (26)}$$

donde $h\nu$ es la energía del fotón incidente.

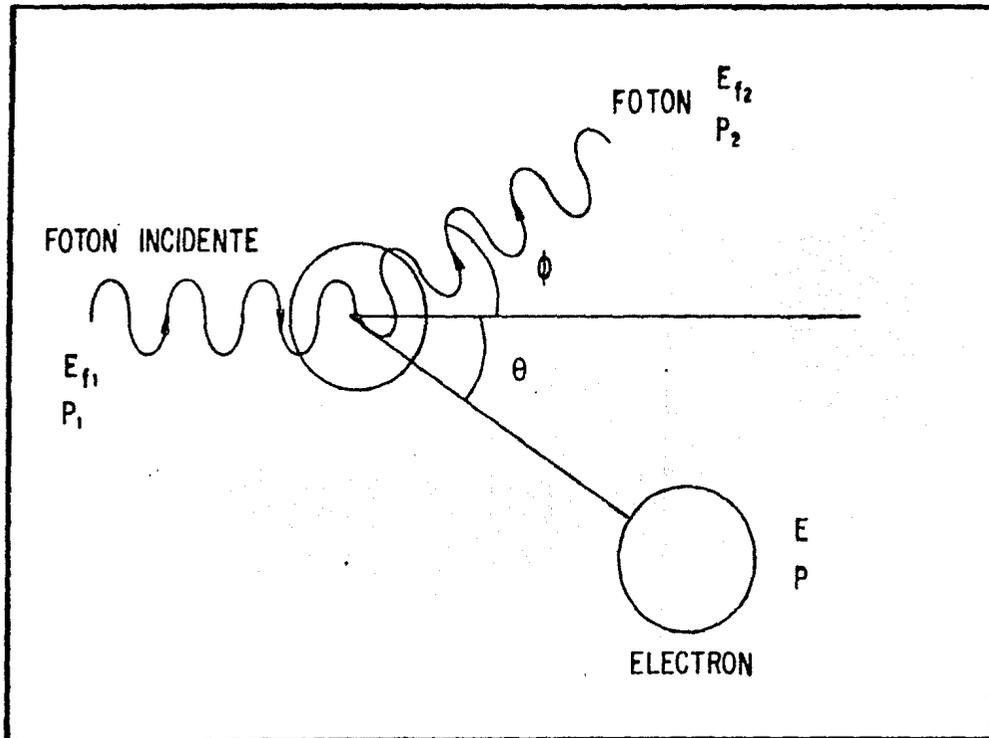


FIGURA 1)- Esquema del efecto Compton, en la interacción fotón - electrón. E_{f_1} , E_{f_2} , E , P_1 , P_2 , p corresponden a las energías y a las cantidades de movimiento del fotón incidente, del dispersado y del electrón respectivamente.

PRODUCCION DE PARES.- Al incidir un fotón en una lámina delgada de un material de alta Z, el fotón desaparece y se forma un par positrón-electrón.

La energía mínima para que se lleve a cabo el proceso en las irradiaciones del núcleo es de 1.023 Mev.

Para la formación de pares en el campo coulombiano del núcleo, la expresión que nos indica la conservación de la energía es :

$$h\nu = E^+ + E^- + E_n + 2m_0c^2 \quad - - - - (29)$$

donde $h\nu$ corresponde a la energía del fotón; E^+ corresponde a la energía del positrón; E^- corresponde a la energía del electrón ; E_n corresponde a la energía cedida al núcleo ; $2m_0c^2$ es la energía equivalente a la masa en reposo del positrón y el electrón .

Al tener la masa en reposo del núcleo una energía equivalente muy grande en comparación con la energía cinética cedida (E_n) por el fotón, se puede despreciar E_n , quedando la ecuación (29) de la forma:

$$h\nu = E^+ + E^- + 2m_0c^2$$

El proceso también se puede realizar en el campo coulombiano de los electrones, en este caso, la energía mínima de los fotones será de 2.040 Mev para que se lleve a cabo la generación de un par positrón-electrón.

DISPERSION RAYLEIGH.- La dispersión coherente (llamada dispersión Rayleigh), tiene lugar cuando el fotón incidente, llega a los límites del electrón y le cede energía sin llegar a sacarlo de su órbita. Este proceso se realiza con mayor probabilidad, con fotones de baja energía y materiales frenados de alta Z, cuando se realiza el efecto fotoeléctrico.

REACCIONES FOTONUCLEARES.-Las reacciones fotonucleares se llevan a cabo, al interaccionar el fotón con el núcleo y cederle toda su energía excitando al núcleo a tal grado, que emita un nucleón (protón o neutrón), realizándose de esta forma la - fotodesintegración del núcleo atómico. Las fotodesintegraciones se realizan para fotones cuya energía es mayor a 8 Mev y materiales frenadores de alta Z, o de energía de 10 a 20 Mev y materiales de baja Z.

DISPERSION DE THOMSON.- Este proceso es semejante a las reacciones fotonucleares, ya que el procedimiento de interacción es igual, pero aquí el fotón sólo pierde parte de su energía, pero es suficiente para sacar el nucleón.

DISPERSION POR RESONANCIA NUCLEAR.- Este proceso es semejante a la dispersión de Thomson, pero en este caso la energía suministrada al núcleo, sólo se lleva a un nivel energético superior.

INTERACCION DE LOS RAYOS X CON LA MATERIA.- Los rayos X y gamma, son fotones que solo presentan diferencia en su origen.- Cuando un electrón pasa de un nivel de mayor energía a uno menos energético emite fotones, originando de esta forma los rayos X. En cambio los rayos gamma aparecen, al bajar el nivel energético del núcleo, creandose de esta forma los fotones -- que originan los rayos gamma. La energía de los fotones será igual al valor de la desexcitación que sufre el núcleo ó el átomo.

Lo anterior nos permite considerar, a los procesos de interacción de rayos X con la materia. En los procesos de in-

teracción de los fotones con la materia, éstos tienden a perder gran parte de su energía en la primera interacción.

INTERACCION DE LOS ELECTRONES CON LA MATERIA.- Los procesos - que permiten a un electrón perder energía al cruzar la materia, presentan serias dificultades para su estudio por las siguientes razones:

i) Efectos relativistas, motivados por su pequeña masa y alta velocidad que pueden alcanzar.

ii) La indistinguibilidad que se presenta al tratar de distinguir a un átomo en un electrón y debido a que este cede gran parte de su energía a un "electrón-blanco", debido a ello, es imposible distinguir a los dos electrones. En este caso se considera al electrón que sale con mayor energía como el electrón incidente. Para electrones de altas energías los procesos más importantes son:

i) La pérdida de energía por radiación.

ii) La pérdida de energía por colisión. De este proceso, el predominante es la colisión elástica.

PERDIDA DE ENERGIA POR EMISION DE RADIACION ELECTROMAGNETICA.

-La teoría electromagnética clásica, afirma que una carga eléctrica acelerada emite ondas electromagnéticas. Cuando un electrón es frenado al interactuar con un átomo, la radiación que resulta de este proceso se llama radiación de ruptura ó frenado (bremsstrahlung). El proceso es predominante, si la energía del electrón se encuentra en el intervalo de 10 a 100 Mev. Cuando la energía cinética E del electrón incidente se encuentra localizada en el intervalo de $0.511 \text{ Mev} < E <$

< 70.07 $Z^{-1/3}$ Mev, el apantallamiento que sufre el núcleo por los electrones de las órbitas, es despreciable y la energía perdida por unidad de longitud es (1):

$$-(dE/dx)_{\text{rad}} = N(E + m_0c^2)(Z(Z + 1)/137)(e^2/m_0c^2)^2(4\ln(2/m_0c^2) / (E + m_0c^2) - 4/3) \quad \text{--- (27)}$$

donde N es el número de átomos por cm^3 ; Z es el número atómico del material frenador; m_0 es la masa en reposo del electrón (g), c es la velocidad de la luz (cm/seg) e es la carga del electrón (e.s.u.).

Pero si la energía del electrón se encuentra en el intervalo; $E > 70.007 Z^{-1/3}$ Mev el apantallamiento que sufre el núcleo por los electrones de las órbitas, es considerable y la pérdida de energía por unidad de longitud es:

$$-(dE/dx)_{\text{rad}} = N(E + m_0c^2)((Z + \frac{1}{2})/137)(e^2/m_0c^2)^2(4\ln \frac{183}{Z^{1/2}} + 2/9) \quad \text{--- (28)}$$

donde $\frac{1}{2}$ es una función del número atómico y del alcance (2).

La formación de esta radiación no produce un cambio en el material frenador, a menos que la radiación generada, sea absorbida por el mismo.

PERDIDA DE ENERGIA POR COLISIONES INELASTICAS.- Un electrón al entrar en colisión con un átomo, cede toda o parte de su energía por medio de interacciones coulombianas, con los electrones del material, llevando al átomo a un nivel energético mayor al de su estado normal.

El proceso es predominante cuando el electrón incidente tiene una energía menor a 100Kev y disminuye rápidamente con el incremento de la energía.

La expresión que indica la pérdida de energía por uni-

dad de longitud, en la interacción fue determinada por H. Bethe (3), obteniendo:

$$-(dE/dx)_{col} = \frac{2e^4\pi}{m_0v^2} NZ \left(\frac{m_0v^2 E}{2\bar{I}^3(1-\beta)} - (2(1-\beta^2)^{1/2} - 1 + \beta^2) \right) \cdot \ln 3 + 1 + \frac{1}{8} (1 - (1 - \beta^2)^{1/2})^2 - \beta^2 \quad (29)$$

donde m_0 es la masa en reposo del electrón (g); e su carga (u.c.e.); v es su velocidad (cm/seg); Z es el número atómico del material frenador; E es la energía del electrón incidente (Mev); $\beta = v/c$; \bar{I} es el potencial promedio de excitación (erg); N es el número de átomos por cm^3 .

Quando $v/c \ll 1$, la ecuación (29) se reduce a:

$$-(dE/dx)_{col} = \frac{2e^4NZ}{m_0c^2} \mathcal{F} (\ln(mv^2/2\bar{I}) + 0.15) \quad (30)$$

pero si $E \gg m_0c^2$ entonces la ecuación (30) se reduce a:

$$-(dE/dx)_{col} = \frac{2Ne^4}{m_0c^2} \mathcal{F} (\ln(E^3/2m_0c^2\bar{I}) + 1/8) \quad (31)$$

La pérdida de la energía por unidad de longitud dada por $-(dE/dx)_{col}$ también se conoce como pérdida de energía específica o poder frenador.

El poder másico de frenamiento mS se define como:

$$mS = -(dE/dx)_{col} (1/\rho) \quad (\text{erg cm}^2/\text{g}) \quad (32)$$

donde ρ es la densidad del material (g/cc).

El potencial promedio de ionización, esta determinado por la energía de amarre de los electrones y se puede obtener por la siguiente relación (4):

$$\bar{I} = KZ$$

donde K es una constante determinada experimentalmente, encontrándose en el intervalo de 8 a 16.

La energía crítica E_0 es la energía del electrón, en la

qual , la energía perdida por radiación es aproximadamente -
igual a la de ionización y se expresa por la siguiente relación

$$E_c \approx 1600 m_0 c^2 / Z \quad - - - - (33)$$

La razón entre las energías perdidas por radiación y -
por colisión es ⁵⁾:

$$(dE/dx)_{rad} / (dE/dx)_{col} \approx EZ / 1600 m_0 c^2 = EZ / 817.6 = E/E_0 \quad - - - - (34)$$

donde E es la energía cinética del electrón expresada en Mev .

Por ésto , la energía perdida por el electrón en la in-
teracción con la materia es :

$$- (dE/dx)_{total} = - (dE/dx)_{rad} - (dE/dx)_{col} \quad - (35)$$

DISPERSION ELASTICA .- En la colisión de un electrón y un áto-
mo se puede presentar la dispersión del electrón por el campo
coulombiano del núcleo , conservando de esta forma la energía
cinética del electrón . Esta dispersión se presenta primordial-
mente para electrones de baja energía y materiales frenadores
cuyo número atómico sea alto .

ALCANCE DE LOS ELECTRONES .- El alcance de los electrones mono-
energéticos está indefinido , debido a la dispersión y a la -
pérdida de energía . Como se observa en la figura 2 , la extra-
polación de la región recta de la curva de transmisión cruza
la línea de la radiación de fondo, llamandole a ésto, alcance -
práctico R_p . El valor donde la curva alcanza la radiación de
fondo , se le llama alcance máximo R_0 ; en la figura 3 se nota
que las partes finales de las curvas de absorción de diferentes
energías de electrones monoenergéticos son similares . La razón
de lo anterior , es que después de atravesar un pequeño espe-
sor del material frenador , el haz se vuelve difuso y entonces

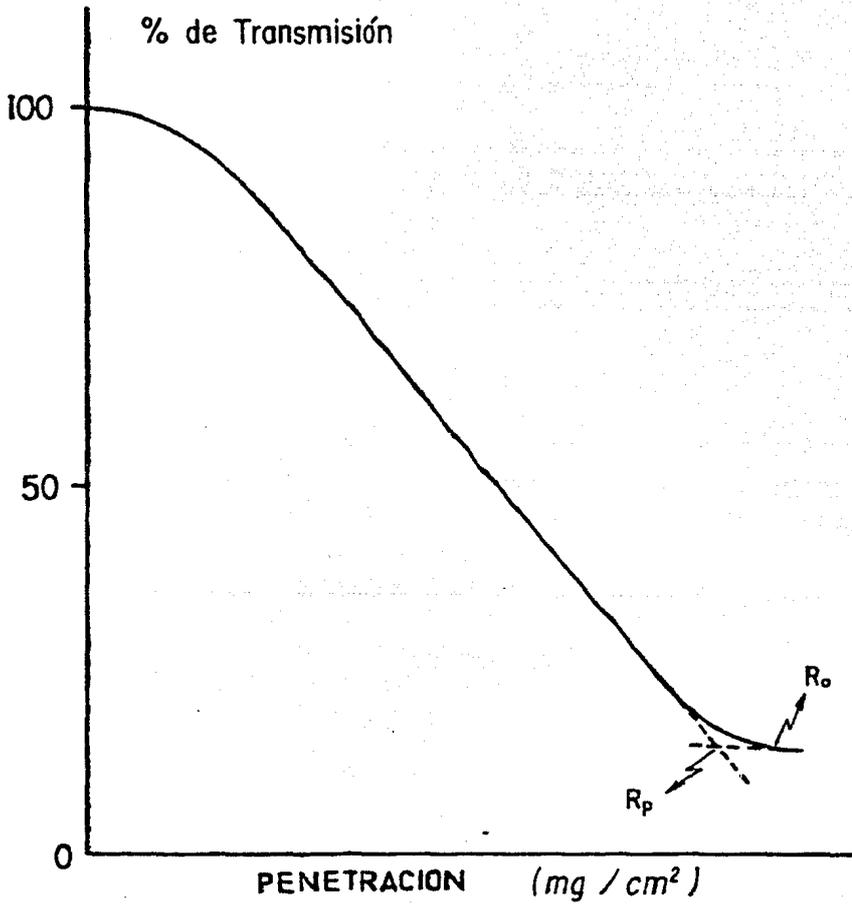


FIGURA 2.- Curva típica de la relación alcance en aluminio contra % de transmisión para la absorción de electrones monoenergéticos. R_p es el alcance práctico y R_0 el alcance máximo.

INTENSIDAD

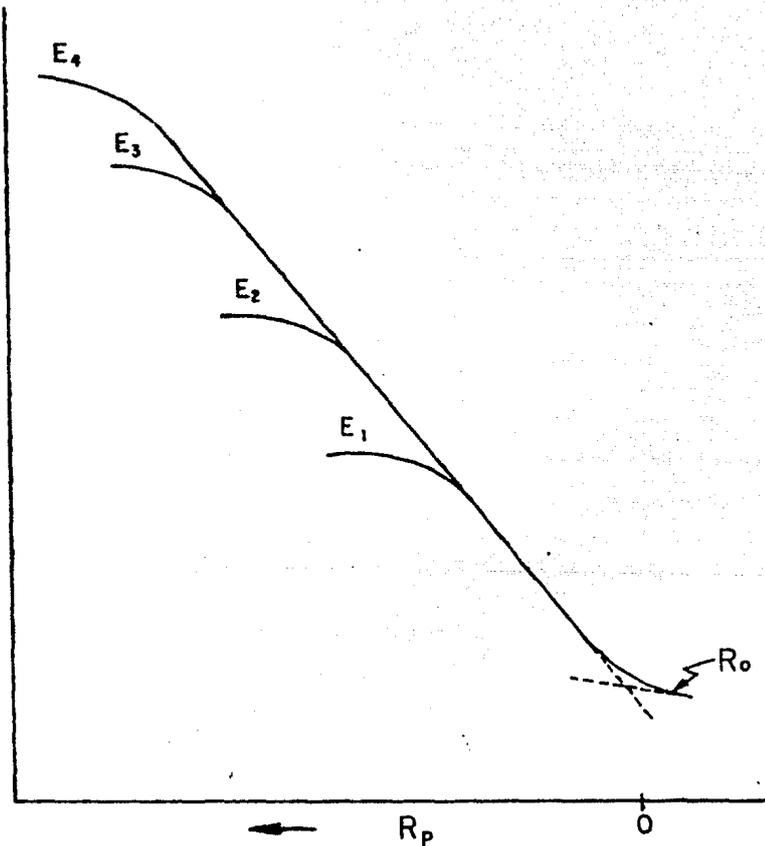


FIGURA 3.- Curvas de absorción para electrones monoenergéticos de diferentes energías, la parte final de las curvas es igual porque al penetrar un espesor los electrones el haz se vuelve difuso, y a partir de ese momento, tienen la misma pendiente y zona final.

dá la misma pendiente al final de las curvas .

La relación empírica que relaciona la energía de los e lectrones con su alcance dada por Katz Penfold⁽⁶⁾ es la siguiente :

$$R = 412 E_0^n \quad \text{para } E_0 < 2.5 \text{ Mev}$$

donde n es igual a $n = 1.265 - 0.094 \ln E_0$; y el alcance esta definido también por :

$$R = 530 E_0 - 106 \quad \text{para } E_0 > 2.5 \text{ Mev}$$

La siguiente tabla presenta los coeficientes de absorción para los procesos más importantes de la interacción de la radiación gamma con la materia (tabla 1) .

COEFICIENTE DE ABSORCION	LINEAL cm ⁻¹	MASICO cm ² /g	ATOMICO cm ² /átomo	ELECTRONICO cm ² / electrón
Coefficiente total de absorción	μ	μ/ρ	μ_a	$e\mu$
Componente de dispersión	μ_d	μ_d/ρ	$a\mu_d$	$e\mu_d$
Componente de energía absorbida	μ_a	μ_a/ρ	$a\mu_a$	$e\mu_a$
Coefficiente de absorción fotoeléctrico	τ	τ/ρ	τ_a	$e\tau$
Componente de dispersión	τ_d	τ_d/ρ	$a\tau_d$	$e\tau_d$
Componente de energía absorbida	τ_a	τ_a/ρ	$a\tau_a$	$e\tau_a$
Coefficiente de absorción Compton	σ	σ/ρ	σ_a	$e\sigma$
Componente de dispersión	σ_d	σ_d/ρ	$a\sigma_d$	$e\sigma_d$
Componente de energía absorbida	σ_a	σ_a/ρ	$a\sigma_a$	$e\sigma_a$
Coefficiente de absorción de P.P.	K	K/ ρ	aK	eK
Componente de dispersión	K_d	K_d/ρ	aK_d	eK_d
Componente de energía absorbida	K_a	K_a/ρ	aK_a	eK_a

II.- FUENTES DE IRRADIACION E IRRADIADORES, SEGURIDAD RADIOLOGICA EN LA PRESERVACION DE ALIMENTOS Y LA ESTERILIZACION DE PRODUCTOS MEDICO-FARMACEUTICOS .

En el desarrollo de este capítulo se tratarán algunos aspectos prácticos de la irradiación, como es el caso de las fuentes de irradiación, los irradiadores industriales y de laboratorio, sistemas de transportación y diseño de irradiadores.

RADIOISOTOPOS.- En la irradiación de alimentos y productos médicos se usan como fuentes típicas las radiaciones Cobalto 60 y Cesio 137. El Cobalto 60 es producido por el bombardeo de electrones sobre Cobalto 59 en un reactor nuclear. El Cesio 137 es químicamente obtenido a partir de la separación y purificación de los desperdicios de las sustancias combustibles al realizarse la fisión nuclear en un reactor, lograndose obtener un polvo de sulfuro de Cesio o Cloruro de Cesio; los cuales son comprimidos hasta obtener la forma compacta de una pastilla con una densidad de 33 g/cc y una actividad de 18 a 22 Ci respectivamente por grado de material sólido.

La radiación gamma de estos dos radioisótopos tiene el poder de penetración, energías, vida media, potencia y actividad mostrados en la tabla 2, las cuales con características necesarias para ser usadas en la irradiación de alimentos y productos médicos.

CARACTERISTICA	COBALTO 60	CESIO 137
Forma típica de la fuente	metal	CsCl en pastillas
Vida media	5.3 años	30 años
Actividad promedio específica	1-400 Ci / año	1-25 Ci / año
Energía gamma	1.17 y 1.33 Mev	0.66 Mev
Potencia	65 Ci / W	307 Ci / W

TABLA 2 .- Características de la radiación del Cobalto 60 y el Cesio 137 .

Existen diferentes tipos de Fuentes, entre los predomi-
nantes están las que tienen forma de varilla ó de una placa -
ya que tienen la ventaja de que la autoabsorción es moderada-
mente reducida. Entre ellas se encuentran:

- La Agencia de Energía Atómica del Reino Unido;-
produce una fuente en forma de varilla pequeña (fuente lápiz)
compuesta de una barra de Cobalto 60 encapsulada en acero ino-
xidable, con las dimensiones mostradas, en la siguiente figura
(4):

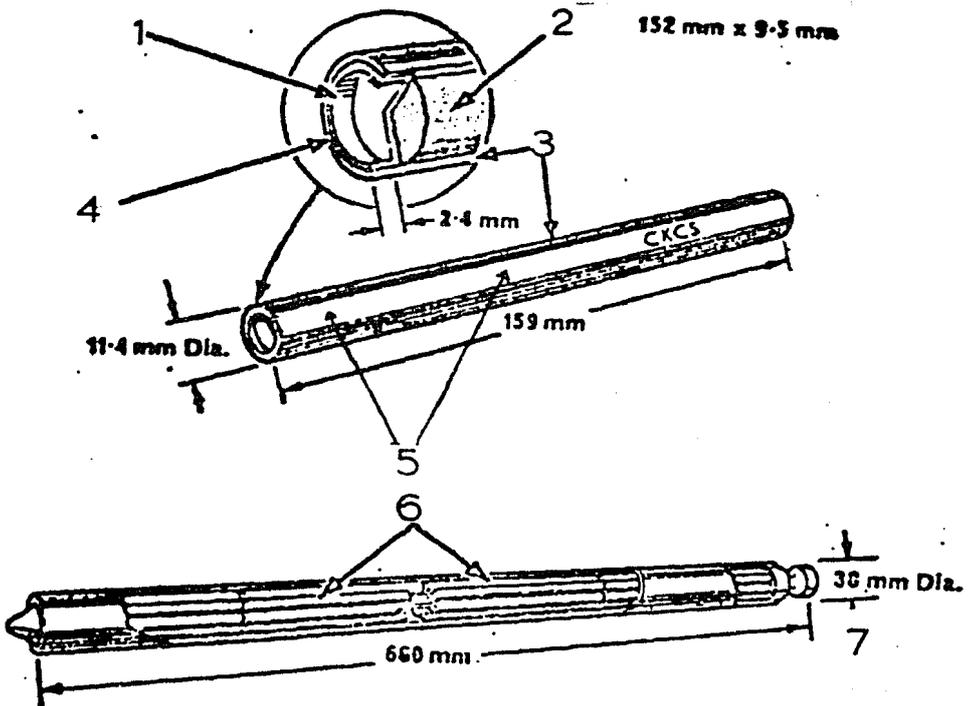


FIGURA 4.- 1 es la cápsula de acero inoxidable . 2 es el Cobal-
to . 3 es el tubo de acero inoxidable . 4 la soldadura . 5 la
fuente lápiz . 6 es el arresle de las 24 fuente lápiz . 7 es la
fuente industrial .

Esta fuente lápiz se usa como unidad en la fuente de tipo industrial la cual, está constituida por 24 de estas -- fuentes, encapsuladas en tubo de acero inoxidable.

- La fuente de Cobalto 60 producida por la CEA y CEN de E.U.A., está constituida por placas de Cobalto 60 encapsuladas en tubos de acero inoxidable con las dimensiones mostradas en la figura (5).

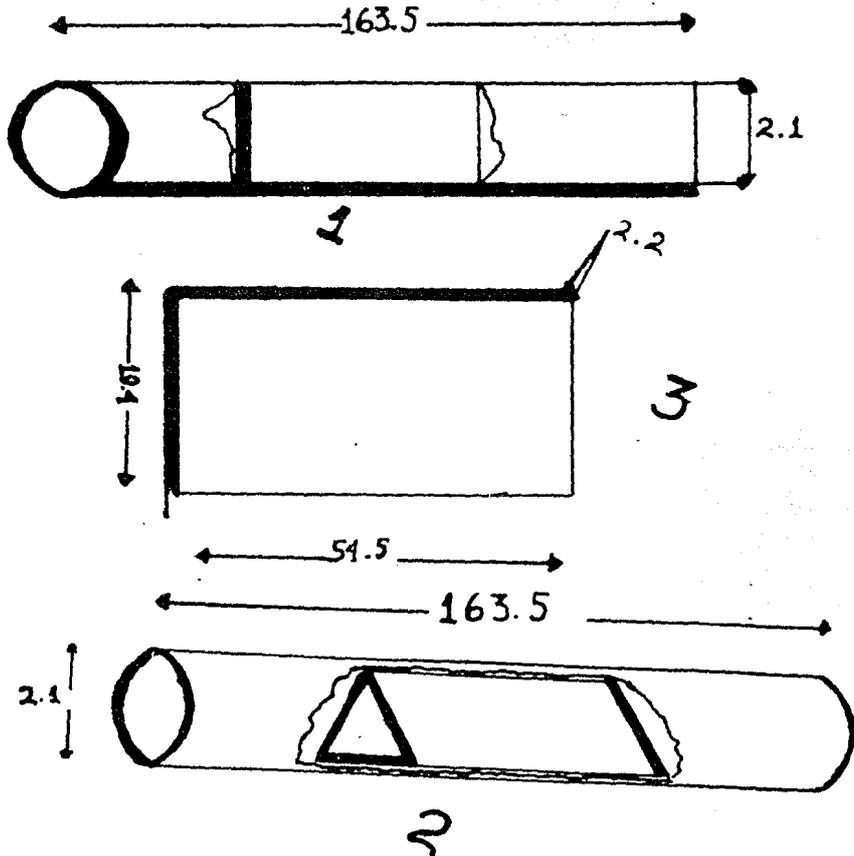


FIGURA 5.- 1 primer encapsulado . 2 segundo encapsulado . 3 - placa de Cobalto 60 .

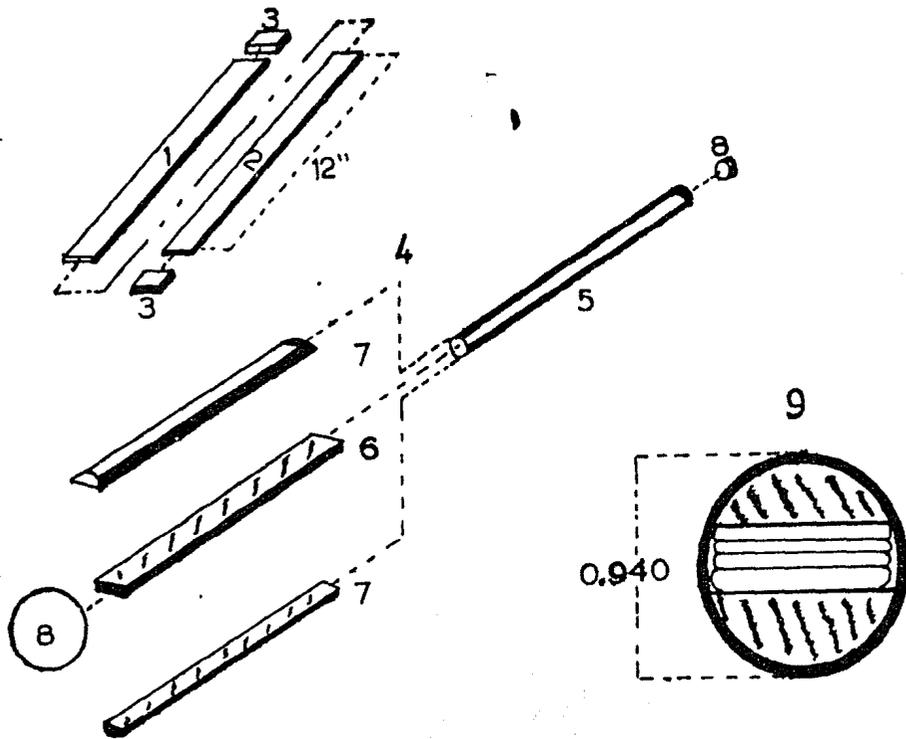


FIGURA 7.- Fuente estandar Mark I, producida por Brookhaven National Laboratory, E.U.A.. 1.- Cubierta de acero inoxidable. 2.- Tira de Cobalto 60. 3.- Tapas. 4.- Vista interior. 5.- Cubierta de aluminio. 6.- Tira de Cobalto 60 con una cubierta de acero inoxidable. 7.- Separador de aluminio. 8.- Tapón de aluminio. 9.- Sección transversal.

- En Francia, se utiliza como fuente lápiz (1), - una placa con las dimensiones mostradas en la figura(6).

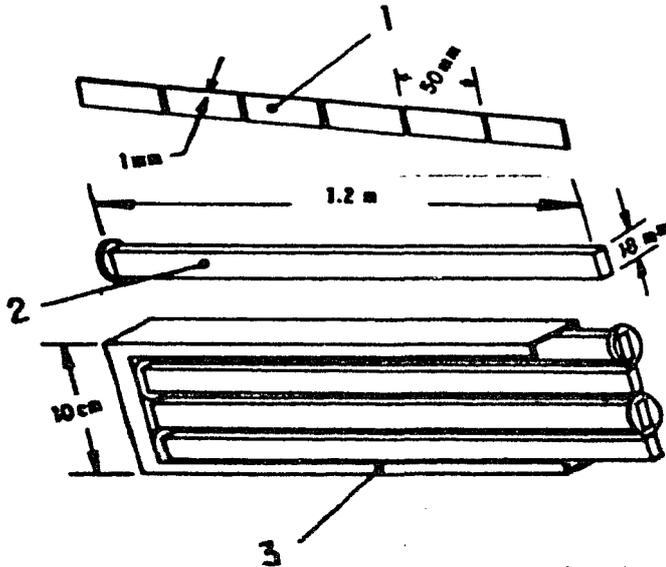


FIGURA 6 .- fuente con clave de la barra PI - 18 . 1.- Placa .
2.- Fuente de Cobalto 60 . 3.- Arreglo de la fuente 30 000 Ci.

Cuando 24 de estas fuentes lápiz están montadas en un prisma rectangular (2), crean la fuente industrial⁽⁸⁾ que puede ser montada en un dispositivo (3), que permita tener una actividad mayor, en la fuente del irradiador.

Las fuentes Mark I⁽⁹⁾ y Mark II⁽¹⁰⁾ (figura 7), son intercambiables. El diseño de la fuente Mark II presenta la ventaja de que el revestimiento interior va metalúrgicamente unido a el alma del Cobalto. Así es posible por primera vez,-

reactivar estos elementos después de utilizarlos cierto tiempo; las fuentes se fabrican en tamaños que permiten montarlas fácilmente, formando placas de varias dimensiones y formas.

La fuente Mark I es una tira de 65 gramos de Cobalto encapsulados y activados. Después de éillo, es nuevamente encapsulado en acero inoxidable y es cuando presenta las siguientes dimensiones: 33.28 cm. x 3.84 mm. x 30.48 mm.

Esta fuente es utilizada en diferentes irradiadores -- por ejemplo en High Intensity Radiation Development Laboratory, en Brookhaven; Marine Products Development Irradiator en Gloucester Mass; Irradiador Móvil de Gammas U.S. Army Quartermaster's Food Irradiation, en Nantick Mass., donde las actividades de las fuentes son de 10 a 125 Ci/g.

Las ventajas económicas para el uso de estas fuentes son:

i) Buena cantidad y calidad en la producción a un costo mínimo.

ii) Puede utilizarse en varios irradiadores sin modificaciones y no llegan a ser obsoletas y además tienen una larga vida.

iii) La autoabsorción de fotones es del orden del 7% y comparados con otros diseños de fuentes que tienen 30% de autoabsorción el autocalentamiento es mínimo y se obtiene una alta eficiencia.

iv) El delgado diseño rectangular en comparación con los tubulares, proveen un mayor flujo de radiación por Cu en área útil.

Las ventajas citadas para el Mark I, también son aplicables al Mark II, con las ventajas adicionales:

i') Se obtiene una mayor transferencia de calor , lo que provoca que en el primer encapsulado no existen zonas sin aire y en el segundo encapsulado los lugares vacíos son - mínimos .

ii') Todo el proceso de encapsulado se aumenta por el forro adherido al Cobalto 60 .

iii') La disminución de la autoabsorción puede ser lograda en el encapsulado de las capas que pueden ser felizmente disminuidas .

iv') Las fuentes no son colocadas en una activación lenta como en el caso del Mark I, sino que ésta es colocada - sin más protección que una simple asa .

v') Una celda caliente más pequeña es requerida .

vi') Las fuentes de este tipo pueden ser irradiadas tiempo después de su uso , con un removimiento del segundo en capsulamiento colocandolo en un contenedor de activación y re incertándolos en un reactor .

IRRADIADORES INDUSTRIALES Y DE LABORATORIO .- Las plantas de irradiación que procesan productos médicos y alimentos están construídas básicamente por :

a) La fuente que utiliza principalmente es el Cobalto 60 y Cesio 137 presentando formas y arreglos que permitieran obtener una mayor eficiencia ; siendo las principales las que presentan una forma de tubo ó de tira y en arreglos de placas o anulares .

b) El depósito para almacenar la fuente , puede - contener agua ó estar seco con la diferencia de que en el primer caso las paredes son más delgadas .

c) El mecanismo para transportar la fuente de su depósito para almacenamiento a la posición de irradiación es mecánico ó automático y en algunas ocasiones se presentan - sistemas de seguridad que impiden que la fuente queden fuera de su depósito al faltar la potencia ó al quedar una persona en la zona de irradiación .

d) El mecanismo de paso de la fuente , es un laberinto alrededor de la fuente a base de bandas , rodillos , - elevadores , monorrieles , lo que permite que sea más uniforme la dosis absorbida por los productos , ésto sucede cuando el sistema es automático , en caso contrario las cajas permanecen en un mismo lugar durante toda la irradiación .

e) El sistema para transportar los productos del almacén al mecanismo de paso de la fuente y del retorno de éste a el almacén , se realiza a base de bandas ó monorrieles a través de un laberinto , pero este sistema sólo se presenta - en las plantas automáticas .

f) La celda de irradiación está realizada a base

de concreto de una densidad promedio de 2.35 g/cc , cuyo espesor se encuentra determinado por la actividad de la fuente .

g) En la sala de control existe el equipo que permite controlar a el sistema de irradiación y los detectores de radiación .

Algunas plantas se describen brevemente a continuación :

IRRADIADORES DE PRODUCTOS MEDICOS .- Este tipo de planta fué construido por la Atomic Energy of Canada Limited (A.E.C.L.) para la Ethicon Somerville Inc. localizada en Somerville , - New Jersey , E.U.A. para la esterilización de productos médicos y consta de las partes mostradas en la figura (8) .

La planta tiene una fuente de Cobalto 60 (1) con una capacidad del orden de 1.5 MCi⁽¹¹⁾. La fuente está constituida por pequeñas unidades de Cobalto 60 , cuyas dimensiones son : 8.3 mm de diámetro y 25.2 mm de largo ,encapsuladas debilmente en tubos de acero inoxidable y selladas con soldadura Los tubos van incertados en módulos , que se encuentran montados en una barra dentada la cual, tiene una capacidad para acomodar 20 módulos en dos filas . La fuente es transportada por un elevador neumático (4) , siendo una característica de este elevador la de regresar la fuente a su depósito cuando falta potencia .

La fuente de Cobalto 60 y los mecanismos de irradiación están cubiertos por una celda de concreto (2) , de densidad estandar .

Para el control del area donde se encuentra la planta se cuenta con una consola en el área de control de máquinas (5) y de instrumentos para monitorear el área . La planta presenta un sistema de seguridad , por medio del cual , al exis-

tir personal dentro de la zona de irradiación la fuente permanece dentro de su depósito .

El sistema de transporte (G) tiene una estación de carga-descarga donde las cajas son montadas automáticamente . - Cuando las cajas llegan a la celda la cruzan a través del mecanismo de paso de la fuente , el cual consiste básicamente - de 6 líneas de monorriel (3 a cada lado de la fuente) y de varios mecanismos de transferencia neumática que transporta - las cajas de paquetes alrededor de la fuente en un depósito - patrón cerrado .

Los transportadores al viajar por el monorriel lo hacen en un movimiento intermitente de tal forma de que cada caja - emplea un periodo fijo de tiempo en cada una de las posiciones del transportador , al final del recorrido las cajas son transferidas del monorriel a la estación de carga .

La distribución de las 6 líneas del monorriel permiten al producto una alta absorción de la radiación y obtener una pequeña variación en la dosis absorbida en una dirección a - través del producto que contiene la caja .

Para reducir la variación de la dosis absorbida a un - valor aceptable en una dirección perpendicular al movimiento - de los transportadores , las cajas de producto son transportadas primero en la parte superior del transportador y después en la sección inferior del mismo . El cambio de la posición - toma lugar automáticamente en la estación de carga-descarga.- Este movimiento permite tener una variación en la razón de dosis máxima y mínima de todos los productos irradiados de 1.23 a 1 para cualquier caja con densidad de 0.2 g/cc .

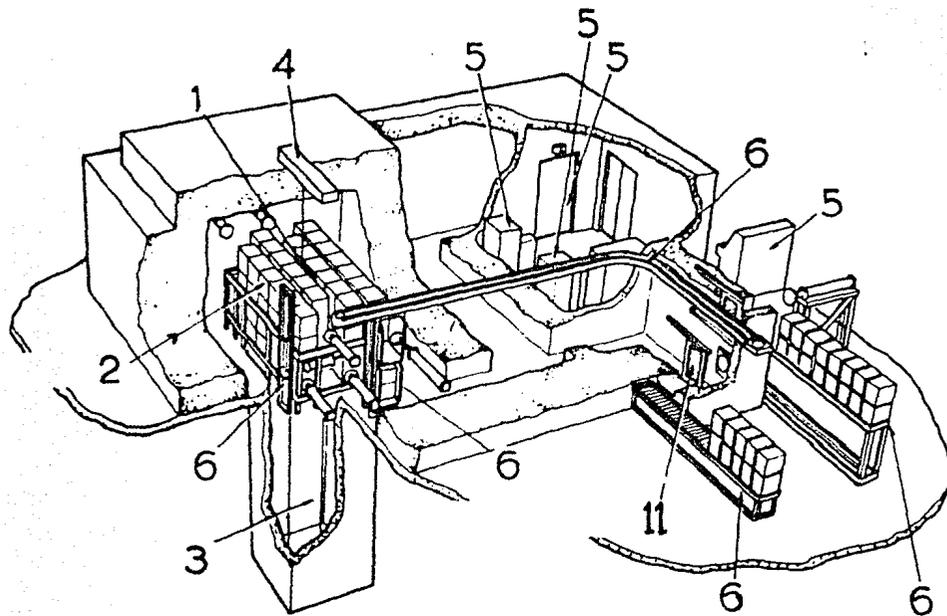


FIGURA 8.- Componentes principales de una planta de esterilización de productos médicos de alta capacidad, JJ - 6500. 1.- Fuente de Cobalto 60. 2.- Celda de irradiación. 3.- Depósito piscina - para almacenar la fuente. 4.- Mecanismo para transportar la fuente, de su depósito a su posición de irradiación. 5.- Área de control. 6.- Sistema de transportación de productos. 11.- Fuente de entrada a la celda de irradiación.

GRAN IRRADIADOR DE GRANOS .- Es el primer irradiador de granos en el mundo siendo construido por la U.S. Atomic Energy Commission , bajo un diseño de Vitro Engineering Company , New York N.Y. , para ser utilizado por U.S. Department of Agriculture en sus laboratorios de Savannah Georgia y consta esencialmente de las partes mostradas en la figura (9) .

Todos los sistemas que constituyen el irradiador trabajan por separado .

La fuente esta constituida por 13 unidades de cobalto que dan una actividad de 26 565 Ci , donde cada fuente lápiz mide 1.5 m de largo , la cual contiene dos barras de Cobalto 60 doblemente encapsulado en aceros inoxidable . Pero como la actividad de cada barra es diferente , el arreglo es de tal forma que la barra de mayor actividad se encuentra en la periferia del arreglo de la fuente y la de menor actividad en el centro de la fuente . Esta construcción permite una radiación bastante uniforme en el centro de la zona de irradiación (9).

Cuando no se encuentra en uso la fuente , ésta se encuentra almacenada en un depósito de concreto de densidad estandar (2) forrado de acero y plomo .

El tratamiento que reciben los granos es de la siguiente forma : Los granos viajan lentamente a través de la celda de concreto (4) continuamente en el plano de la fuente y en su alrededor , lo que minimiza la pérdida de energía , la velocidad de este movimiento nos da la razón de dosis siendo controlado con una válvula que tiene medidor , localizada abajo del tablero de control y puede variar de una a cinco vueltas en una hora el recorrido del grano a través de la celda de irradiación A la salida de la celda los granos penetran en una corriente-

de aire que los mueve a través de unos tubos (6) hasta el almacén . Los dosímetros usados son fluoruro de litio .

El sistema de irradiación de productos empacados es un sistema diferente excepto por la fuente . El arreglo de la fuente es movido a una posición que permite el tratamiento de productos empacados (4) que se mueven a través de la celda en contenedores de aluminio , ya sea en los transportadores de entrada (6) ó de salida (7) . Los contenedores de aluminio miden 29.44 x 42.24 x 125.44 cm. y la dosis es regulada por un ajuste al reloj electrónico del irradiador , que controla la velocidad con que se mueve el transportador (6,7) .

La capacidad de trabajo del irradiador es de 2 250 Kg/h de granos ó de 12 600 Kg/h de productos empacados a una dosis de 25 a 50 Krads .

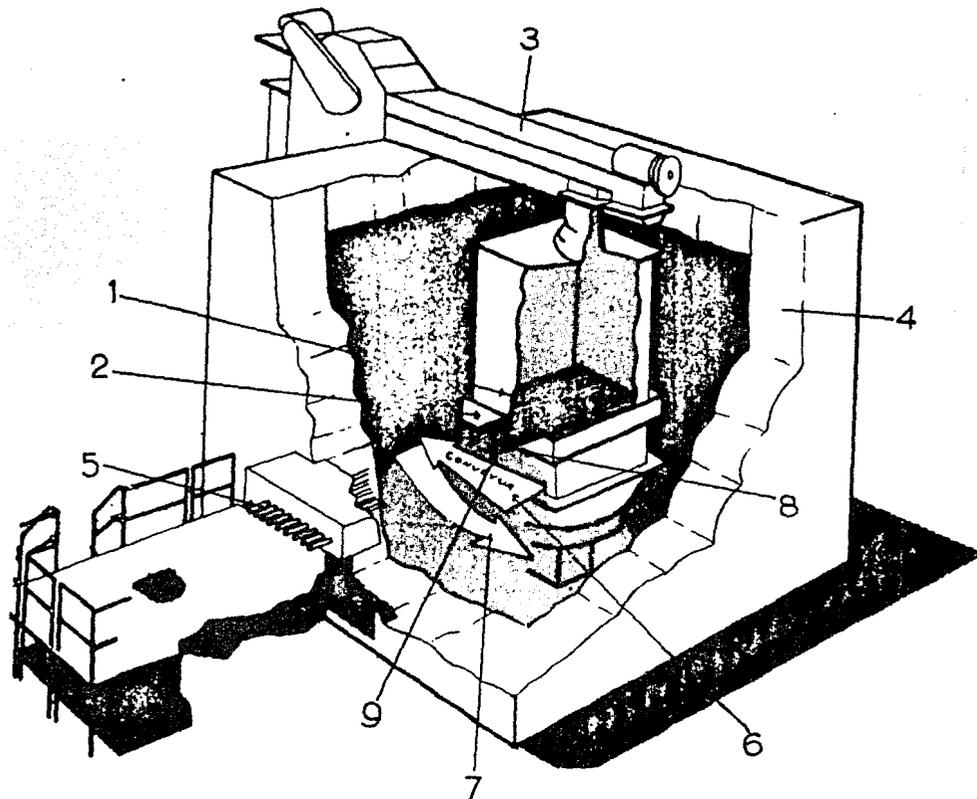


FIGURA 9 .- Componentes básicos del irradiador de granos. 1.- Fuente de Cobalto 60. 2.- Depósito de la fuente. 3.- Gusano transportador. 4.- Celda de concreto de densidad estándar. 5.- Tubos de salida. 6.- Transportador de entrada para la irradiación de paquetes. 7.- Transportador de salida para la irradiación de paquetes. 8.- Nueva posición de la fuente. 9.- Celda de irradiación.

IRRADIADOR DE NESSIMOS .- Este irradiador fué construído por la A.E.C.L. y consta de las partes mostradas en la figura 10.

El irradiador emplea una fuente de Cobalto 60 ,que tiene como unidad la llamada fuente lápiz que se encuentra en una posición horizontal . El depósito para almacenar la fuente (1) contiene agua . El sistema de transporte de los productos se realiza por medio de bandas de rodillos .

La celda de irradiación se construyó de concreto de densidad estandar.La eficiencia de la fuente es de 38 % y la razón de dosis absorbida máxima y mínima es de 1.3 a 1 para los paquetes irradiados .

A continuación se presentan algunas consideraciones del costo de la producción .

CAPACIDAD		FUENTE ⁶⁰ Co	COSTO DEL -
(lb/h)	(10 ⁶ x lb/año)	(Cl)	PROCESO EN 1973 (c/lb)
2 500	10.4	69 000	18.63
5 000	20.8	138 000	9.88
7 200	30.0	198 000	7.25
10 000	41.6	275 000	5.63

Estos cálculos son hechos para :

- Un irradiador de \$ 38 962 500 .
- Costo de la construcción \$ 15 625 000 .
- Eficiencia de la fuente 35 % .
- Trabajo de dos hombres para 4 160 hs. al año .
- Dosis de radicación de 0.11 Mrads .

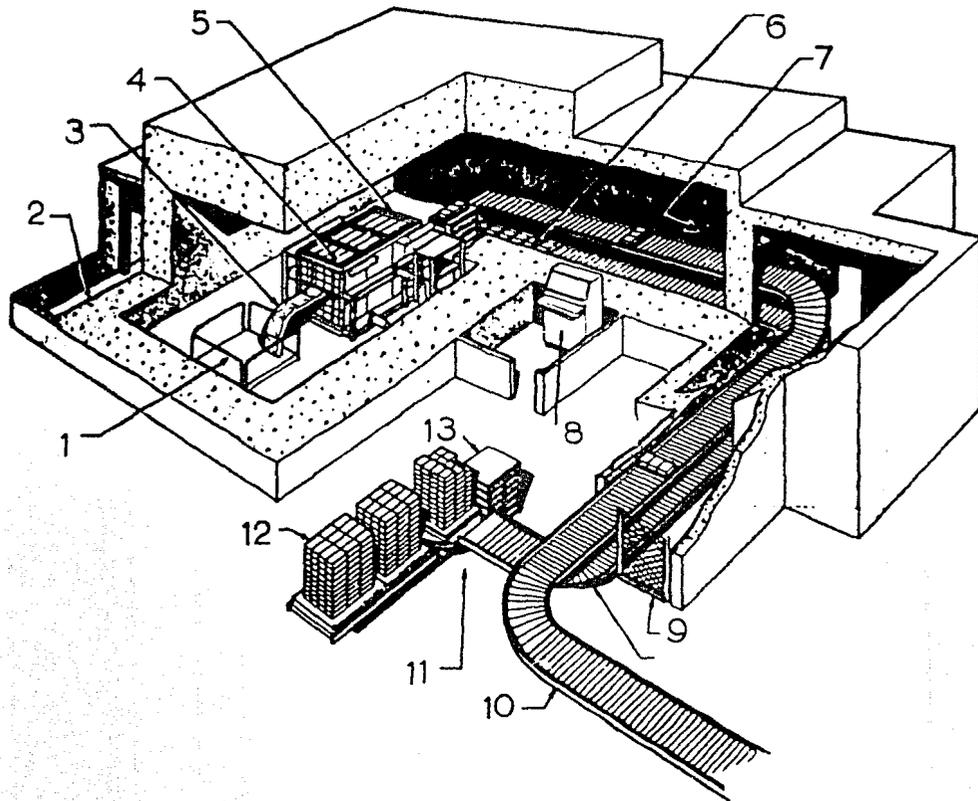


FIGURA 10 .- Componentes básicos del irradiador de pescado. 1.- Piscina para almacenar la fuente 2.- Cuarto de servicio. 3.- Mecanismo de paso de la fuente. 4.- Transportadores. 5.- Mecanismo de paso de la fuente. 6.- Banda de entrada. 7.- Laberinto. 8.- Sala de control. 9.- Cerca automática para evitar el paso del personal al laberinto. 10.- Banda de salida. 11.- Estación de descarga. - 12.- Columna de cajas. 13.- Cajas.

PLANTA DE DEMOSTRACION .- La planta fué construida para Wanta ge Research Laboratory por Rubery Organization . Los componen tes básicos de la planta se muestran en la figura 11 .

La planta tiene una protección biológica (2) de 163.7 cm. de ancho de concreto de densidad estandar , con una fuente de Cobalto 60 (3) de 500 KCi de forma rectangular plana en dos arreglos de 243.36 x 60.84 cm. . La fuente se encuentra alma cenada en un depósito (9,10,11) de las siguientes dimensiones 546.56 cm.de profundidad ; 265.04 cm de ancho ; 365.04 cm. de largo .Las paredes se encuentran protegidas con acero inoxidab le y el agua desmineralizada circula continuamente a través de un filtro que descarga de iones el agua .

Esta planta procesa paquetes cuyas máximas dimensiones son 34 x 29 x 22 cm. con una tolerancia máxima de 5 cm. ya - que las necesidades de la planta en la zona de irradiación - es tener una línea de 12 paquetes cuyas dimensiones serán -- constantes , para que cuando sean levantadas se realice este movimiento correctamente .

La cámara de irradiación tiene las siguientes medidas 608.4 x 608.4 x 425.88 cm. .

Existen dos sistemas de transporte , uno en el almacén para amortiguar los choques de las cajas cuando se cargan ma- nualmente (7,8) y otro que hace el recorrido en la celda de - irradiación (5,6) hasta que llega nuevamente al almacén . Es- tos sistemas de transporte son manejados a velocidad variable con motores hidráulicos (4) incorporados a las cajas de engra nes , que pueden ser cambiados sin mayor modificación y así - obtener la velocidad requerida .

A continuación se anotan unas consideraciones del costo

de irradiación :

CAPACIDAD		FUENTE ⁶⁰ Co	COSTO DEL PROCESO EN 1973 (c/lb)
(lb/h)	(10 ⁶ x lb/año)	(KCi)	
15 000	30	50	3.38
30 000	60	100	1.75
60 000	120	200	1.00

Estos cálculos están realizados para las siguientes con
sideraciones :

- a) Costo del irradiador \$ 2 187 500 .
- b) Costo de construcción \$ 937 500 .
- c) Eficiencia de la fuente 19 % .
- d) Trabajo para dos hombres durante 2 000 hs anuales .
- e) Dosis de radiación mínima 7.5 Krads .

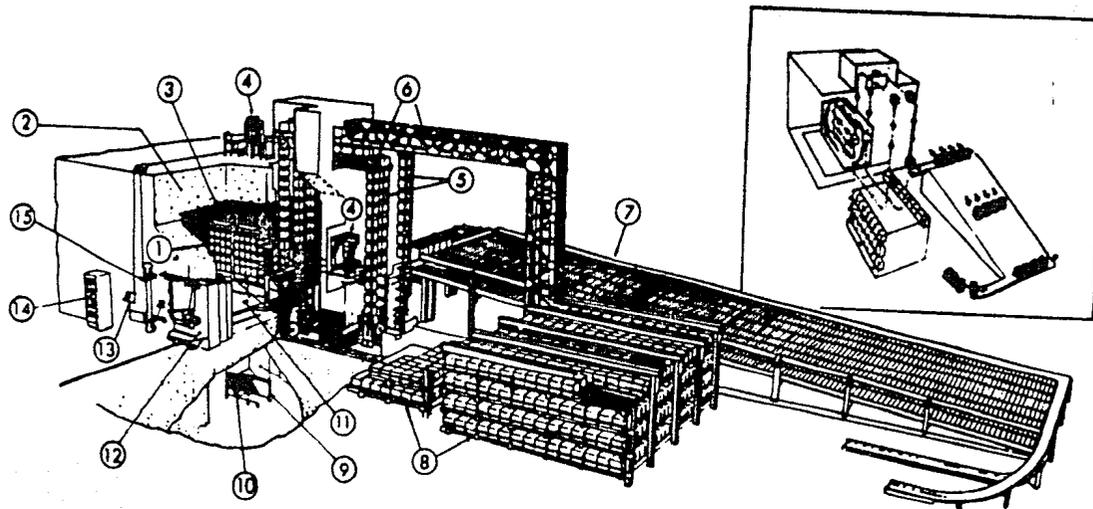


FIGURA 11.- Componentes básicos de la planta de Wantage. 1.- Sistema de irradiación. 2.- Celda de concreto. 3.- Fuente. 4.- Mecanismo hidráulico para almacenar la fuente. 5.- Banda de salida. 6.- Banda de entrada. 7.- Banda para entrada a la celda de irradiación. 8.- Banda para manejar los paquetes irradiados que se dirigen a el almacén. 9.- Fuente en posición de almacenaje. 10.- Guías de la fuente. 11.- Agua del almacén. 12.- Puerta para entrar a la zona de irradiación. 13.- Mecanismo para transportar a la fuente. 14.- Panel de control. 15.- Mecanismo para hacer la —transportación de la fuente..16.- Secuencia de flujo de los productos irradiados.

TRANSPORTE⁽¹⁶⁾ El transporte de productos es de importancia primordial en la construcción de un irradiador , para lo cual es necesario considerar varios aspectos . Entre los más importantes se encuentra el recorrido que tendrá el producto , la actividad , la posición de la fuente y la utilidad de bandas ó monorraiel (vertical y horizontal) .

La forma de desplazar los productos alrededor de la fuente va a depender de las condiciones de irradiación . --- Cuando la fuente se encuentra vertical la solución de transporte de productos es hacerlo en forma horizontal , esto se realiza cuando la fuente se encuentra almacenada en una piscina. Si la fuente se encuentra horizontal y se desea tener una gran capacidad y un buen rendimiento teniendo la fuente almacenada en un depósito seco , la solución para transportar los productos es un desplazamiento horizontal , pero existe el peligro de una ruptura de una parte del transportador por el esfuerzo que realiza al cambiar de movimiento horizontal y así caer a la fuente , por ello , se recomienda emplear bandas totalmente metálicas y transportadores bastantes resistentes . Cuando la fuente se encuentra en una piscina y en una posición vertical diferente a la primera solución , el desplazamiento más seguro es el vertical . Este arreglo de la fuente y desplazamiento es más seguro que los anteriores lo que justifica el amplio uso del mismo .

Los arreglos de 1,2,3,4 ó más filas de material en cada lado de la fuente será determinado por la actividad de la fuente . La figura 12 indica esquemáticamente el recorrido de un monorraiel de 4 pasos con transportador vertical (6) . En este sistema el producto recorre cuatro veces la celda de irradia-

ción ; porque el producto pasa a cada vuelta a una posición inferior en el transportador de productos (una vuelta en 1 , otra vuelta en 2 , otra en 3 y una última en 4) este cambio se realiza en una estación de carga-descarga (7) donde el producto que está en la posición 4 sale del transportador y entra en la posición 1 un nuevo paquete ,por ello , el paquete tiene un movimiento vertical y horizontal en su recorrido a través del campo radioactivo , lo que permite que sea más uniforme la dosis absorbida .

El recorrido para transportar los productos alrededor de la fuente vertical es la siguiente : al llegar la caja de productos del almacén para el transportar del monorriel y llega al sistema de paso de la fuente lo recorre y llega a una posición donde un pistón neumático coloca nuevamente al transportador en el monorriel , llegando así al recorrido inicial en donde aborda la banda de salida que lo llevará al almacén .

DISEÑO DE UNA PLANTA DE IRRADIACION .- En la construcción de plantas para irradiar productos es común los arreglos de 1,2, 3,4, ó más filas de material en cada lado de la fuente siendo determinado este número por la actividad de la fuente .

En algunos diseños de plantas con unidades de 4 filas se encuentran alimentadas por dos laberintos , los cuales , - contienen bandas que transportan el material por irradiar , - los laberintos estan unidos al exterior de la celda por otra banda este arreglo permite tener una máxima capacidad en este tipo de plantas de irradiación . La capacidad de la misma puede ser reducida por :

- i) material estático en el laberinto de entrada .
- ii) Reducción en el número de filas alrededor de la fuente .
- iii) Aumento de la separación entre paquetes de cada fila .

Los dos últimos puntos además de reducir la eficiencia de las plantas reduce la cantidad de material en la celda . - El primer inciso requiere que el paquete por irradiar esté sobre los transportadores afuera en lugar de adentro .

Los transportadores que se encuentran adentro de la celda son desde un punto de vista ingeniéril difícil de proyectar ya que como las operaciones se suceden en un area donde el acceso del personal no es posible mientras la planta esta operando , un defecto en el sistema de transportación cerraría la entrada a la celda de irradiación , la falla del sistema requeriría que afuera de la celda se realice una rápida rectificación que deje sin efecto el cierre de la entrada .

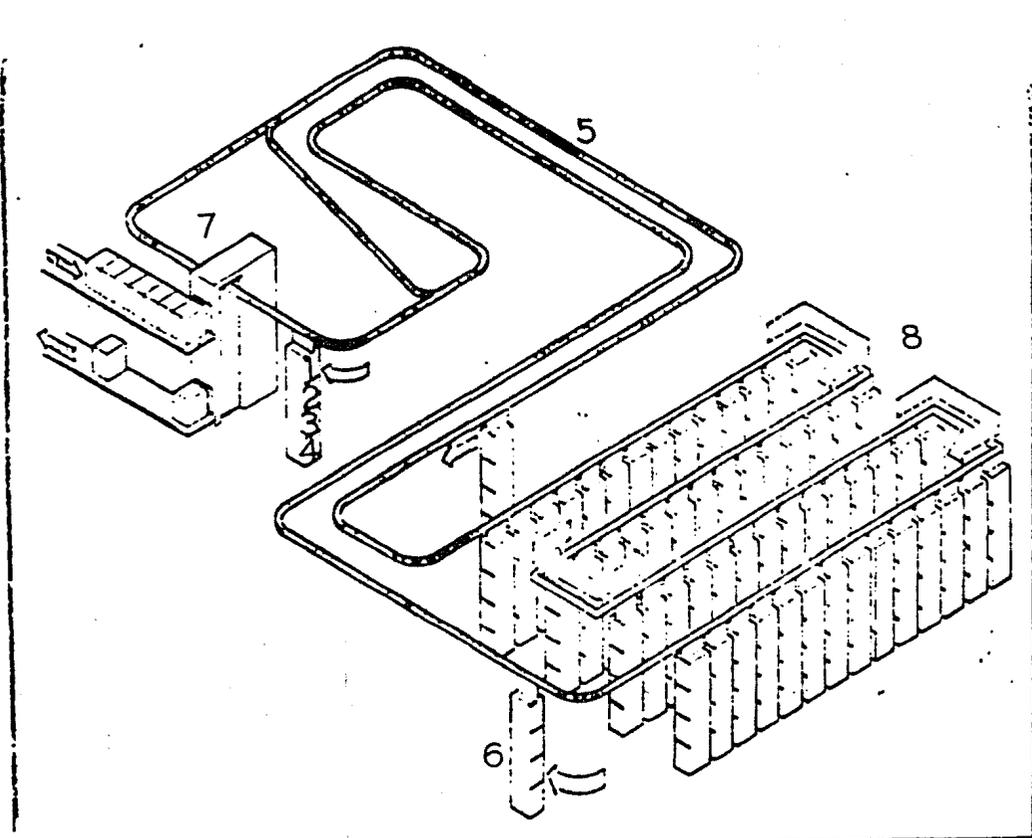


FIGURA 12 .- El recorrido de un transportador en una planta con un sistema de paso de 4 líneas. 1.- Primera posición del transportador. 2.- Segunda posición del transportador. 3.- Tercera posición del transportador. 4.- Cuarta posición del transportador. 5.- Monorriel. 6.- Transportador vertical. 7.- Estación de carga - descarga. 8.- Mecanismo de paso de la fuente, con 4 - filas de monorriel.

FACTORES QUE INFLUYEN EN EL COSTO .- Una planta de irradiación probablemente más que otro tipo de plantas es diseñado con parte de la estructura alargada de tal forma que la capacidad -- pueda ser aumentada de acuerdo con las necesidades .

El incremento en el costo puede deberse a que teniendo bandas con un intervalo de velocidad muy variado y con una placa fuente que tiene una capacidad de 20 ó 30 tubos de material radioactivo esté cargado inicialmente por sólo dos de estos - tubos .

La capacidad de la fuente es frecuentemente determinada por el número de tubos fuente , su nivel de actividad promedio basando el período de la fuente en 15 años . La capacidad de la fuente puede ser incrementada si se aumenta la actividad - promedio específica de la fuente y si nosotros suponemos que la actividad de la fuente máxima permanece constante , esto - sólo puede ser hecho reduciendo el período de la fuente , por ejemplo , de 10 a 5 años .

El costo de la restitución de la fuente sin considerar el crédito que se da a las fuentes usadas incrementará el costo de la irradiación .

En algunos casos puede considerarse la compra de una - fuente usada de Cobalto 60 , cuando no se disponga del capital suficiente para una fuente nueva ó si la demanda no justifica la compra . Por estas razones la fuente de Co 60 es de gran utilidad .

Desde un punto de vista económico es más conveniente - manejar una planta con el costo total más común pero con el - costo de operación más barato .

Las plantas que utilizan gammas como medio para preser

var alimentos o esterilizar productos desechables de uso médico farmacéutico, no son las únicas para este fin, sino además existen plantas que emplean aceleradores de electrones que a pesar de tener poca penetración su alta razón de dosis en comparación con las fuentes de Cobalto 60 y Cesio 137, los hacen ser en ciertos casos ampliamente utilizados.

Los aceleradores más empleados en este tipo de aplicación son: el Van de Graaff, Cockcroft-Walton, aceleradores lineales, Dynamitrón, Transformador de resonancia, y el Transformador de núcleo aislado. Algunas de las características de estos aceleradores se presentan en la tabla 3.

Los aceleradores Van de Graaff tienen una aplicación - en la desinfección de granos, por ejemplo en México, en el laboratorio Van de Graaff del Instituto de Física de la UNAM el acelerador de 2 Mev forma parte de una planta piloto para desinfectar maíz. El acelerador lineal de 6 Mev que se encuentra en Burlington, Mass., E.U.A., propiedad de la Ethicon es empleado para esterilizar productos médicos.

ACELERADOR	ENERGIA (MeV)	CORRIENTE (ma)	POTENCIA (Kw)
Dynamitrón	1.5	10	15
	3.0	10	30 (1.86)
Transformador de nucleo aislado	0.5	20	10 (0.95)
Linac	5.0	6.0	30 (3.3)
	10.0	0.5	5 (0.95)
Transformador de resonancia	1 pico	5.0	4.0
	2 pico	6.0	10.0
Van de Graaff	1.5	1.6	25
	4.0	1.0	40

Tabla 3.- Características de varios aceleradores de electrones para preservar alimentos y esterilizar productos médicos .

* Los valores que se encuentran entre parentesis , son - los valores que dan los generadores cuando generan rayos X .

SEGURIDAD RADIOLOGICA..- Una parte fundamental de la aplicación de la irradiación a escala industrial es un rígido control de la seguridad radiológica del personal que trabaja en las plantas de tratamiento ya que cualquier accidente puede ser letal para las personas.

A continuación se hace un breve análisis de algunos aspectos físicos de la seguridad radiológica, principalmente en la Dosimetría de la Radiación.

DETECCION DE RADIACION POR MEDIO DE PELICULAS FOTOGRAFICAS.-

(17,18,19).- Las películas tienen un intervalo de uso de acuerdo a la emulsión usada, pero no cualquier emulsión puede llenar todos los requisitos necesarios. El intervalo en el cual se utiliza la película es de 100 mR a 1 000 R dependiendo de la película usada. Para el caso del intervalo de 1 a 1 000 R se utiliza una película muy sensible, el error que presenta la lectura es del 20% mayor que el valor real, lo que permite al usar este tipo de dosímetro un mayor margen de seguridad.

La radiación ionizante afecta a la emulsión fotográfica de una forma similar a la producida por la luz sensible o sea crear un cierto ennegrecimiento en la película.

La película es normalmente una base de acetato de celulosa o de plástico cubierta en uno ó en ambos lados de una capa gelatinosa fotosensible (emulsión) que contienen cristales de haluro de plata. Las películas que se utilizan en la vigilancia radiológica presenta un gran contenido de bromuro de plata al cual se le agrega yodo. Los granos de las películas son prácticamente esféricos en consecuencia la pérdida -

de energía de la radiación ionizante dentro de la emulsión es relativamente isotrópica.

El diámetro de los granos sin revelar oscila entre 0.1 y 1 μ m correspondiendo el límite inferior a las emulsiones nucleares.

El tratamiento de la película fotográfica comprende generalmente de las siguientes operaciones: revelado, fijador, lavado y secado.

Las radiaciones ionizantes que inciden sobre la película pierden energía transmitiéndola a los electrones de la banda de conducción del haluro de plata. Los electrones que emigran alrededor del cristal y eventualmente quedan atrapados en los centros de sensibilidad que pueden consistir en impurezas o deformaciones en la estructura del cristal.

El potencial electrostático formado alrededor de los centros da como resultado la acumulación de algunos iones de plata que tienden a moverse libremente en el cristal, dependiendo el número de iones que emigran de la temperatura del cristal.

Finalmente los iones se neutralizan para formar moléculas de plata neutras, las que constituyen la imagen latente de la emulsión y actúan como catalizador durante el proceso de revelado para convertir completamente el grano en plata libre, así el desarrollo del proceso es realmente una amplificación del orden de 10^{12} .

La probabilidad de que se establezca una imagen permanente aumenta con el número de electrones en los centros de sensibilidad, número que es proporcional a la energía absorbida por la película.

Para el cálculo de dosis elevadas por medio de placas fotográficas existen dos métodos : uno de ellos consiste en destruir en forma parcial la imagen latente antes del revelado normal por medio de una oxidación con ácido crómico logrando así disminuir la sensibilidad de los haluros de plata a la acción del revelador , obteniéndose densidades ópticas medibles aún para exposiciones de 150 R . La segunda forma consiste en disminuir la acción del revelador añadiéndole agentes estabilizadores , estas sustancias ejercen un efecto desensibilizador sobre la emulsión fotográfica e inhibiendo el proceso de revelado se logra obtener densidades ópticas normales para películas expuestas a altas dosis de absorción ; para este fin a dado gran resultado el benzotriazol y la fenilmercaptotetrazol .

Debido a la relativa sensibilidad de la película fotográfica a ciertas energías es necesario dotarla de filtros metálicos , los que en conjunto con lo anterior forman el dosímetro .

Se recomienda utilizar como filtro al estaño para la dosificación de películas beta ; al cadmio para su dosificación de neutrones térmicos y duraaluminio para los rayos X .

Cuando se almacena la película antes de utilizarse es recomendable que se encuentre a una temperatura dentro del intervalo de 5 a 15 °C y una humedad relativa de 40 % además de observar que no tengan una gran variación de temperatura las películas porque con ello trae consigo una nociva condensación de agua en la superficie de la película .

La película presenta una gran ventaja sobre otros dosímetros ya que su información es permanente y práctica pero es

el dosímetro menos exacto .

DOSIMETRO	INTERVALO EFECTIVO (rad)
Solución ácida de sulfato Ferroso (Dosímetro Fricke)	$3 \times 10^3 - 4 \times 10^4$
Solución ácida de Super-Fricke (- Dosímetro Fricke saturado de oxígeno)	$3 \times 10^3 - 2 \times 10^5$
Agua - Benzeno	$5 \times 10^3 - 7 \times 10^4$
Tintura Radiocrómica	$1 \times 10^2 - 1 \times 10^7$
Películas fotográficas	$2 \times 10^2 - 1 \times 10^7$
Dosímetros Termoluminocentes: Fluoruro de Litio y Fluoruro de Calcio	$2 \times 10^2 - 1 \times 10^5$
Dosimetría en vidrio (el vidrio de Co balto y el vidrio de plata)	$1 \times 10^4 - 5 \times 10^6$
Solución de Ferroso Cúprico	$6 \times 10^4 - 8 \times 10^5$
Solución de Ferroso Cúprico (6 veces la concentración normal)	$8 \times 10^5 - 8 \times 10^6$
Solución de Sulfato Cérico	$1 \times 10^4 - 2 \times 10^7$
Solución de ácido Oxálico	$7 \times 10^5 - 5 \times 10^7$
Polimetilmetacrilato (Perspex rojo y - Perspex HX)	$1 \times 10^5 - 1 \times 10^7$
Cloruro de polivinilo	$5 \times 10^5 - 7 \times 10^6$
Películas de Cinemoid	$5 \times 10^5 - 5 \times 10^7$
<u>Celofán azul</u>	<u>$5 \times 10^5 - 1 \times 10^7$</u>

TABLA 4 .- Aquí se muestran los dosímetros más comunes en la detección de radiación empleados en la preservación de alimentos y productos médicos , además de los intervalos efectivos de los mismos .

DOSIMETRO DE FIBRA DE CUARZO ⁽¹⁶⁾ Este dosímetro es una cámara de ionización que contiene dos electrodos siendo uno de ellos de fibra de cuarzo el cual queda libre para moverse fuera de su montaje .

Se colocan cargas semejantes en la fibra y en su montaje lo que permite empujar a la fibra fuera de su montura por repulsión entre ellas . La ionización que se realiza en la cámara por la radiación reduce la carga y permite a la fibra que se mueva en dirección a su posición normal , esta fibra se encuentra soldada a un marco metálico . Además el dosímetro con tiene un sistema óptico y una escala transparente .

El funcionamiento del dosímetro es básicamente enfocar el microscopio a una porción de la fibra , que permita observar a la fibra cuando entra la radiación a la cámara ionizando el volumen sensible , esta ionización descarga el electroscopio siendo la distancia recorrida por la fibra proporcional a la dosis de radiación recibida en la cámara .

Este tipo de dosímetro personal esta construido para resistir las sacudidas de la actividad normal del usuario y se construyen de modo que la deflexión máxima sea de 200 mR , 500 mR , 5 R, 500 R , 1 000 R , leyendose los valores en cualquier momento dirigiéndolo a una fuente de luz y mirando su interior

El dosímetro de fibra de cuarzo presenta la ventaja de poder leer inmediatamente los valores registrados en el dosímetro , siendo bastante exactos los valores que se obtienen con la lectura .

CAMARA DE BOLSILLO (20) .- Una cámara de bolsillo tiene un electrodo cilíndrico con un alambre colector coaxial bien aislado del resto del instrumento . Este alambre se carga y los iones formados en la cámara tienen una carga opuesta a la del alambre y así se dirigen a él reduciendo su carga inicial y cuando se lee esta variación en una unidad separada denominada "lector-cargador" .

La cámara de bolsillo es similar en forma y tamaño a una pluma fuente . Una pequeña cantidad de polvo ó impurezas - en algún aislante del aparato es suficiente para descargarlo completamente . El dejarlo caer ó moverlo bruscamente ocasionará algunas veces la descarga del instrumento .

Los anteriores dosímetros son independientes de la energía cuando ésta es alta (mayor a los 200 Kev) y abajos valores son poco exactos . Pueden (y a menudo deben) usarse curvas de calibración para este tipo de cámaras .

Dosímetros personales basados en fenómenos termoluminiscientes y fotoluminiscientes permiten obtener información de dosis que se encuentran en el intervalo de varias decenas de mR a - varias centenas de mR .

Los dosímetros personales cuando se utilizan para registrar información de rayos beta , deberán tener estas partículas una energía mayor a los 0.2 Mev para atravesar las ventanas , esto no es perjudicial ya que a energías menores no son perjudiciales al cuerpo humano .

Los dosímetros de cuarzo y la cámara de ionización pueden ser usados con precisión para registrar partículas beta - con energías mayores a los 0.5 Mev y con ventanas especiales desde 0.1 Mev .

Los dosímetros químicos son bastante insensibles a bajas dosis de exposición como son las recibidas por los trabajadores profesionales expuestos , pero ofrecen gran ayuda al estimar la dosis durante los accidentes de radiación .

DETECTORES DE RADIACION .- Las partículas cargadas pueden producir una ionización en un gas , fluorescencia en un material

centollador , generar una carga eléctrica en una resistencia una imagen latente en una emulsión fotográfica . Las radiaciones sin carga no son detectables directamente como lo son las radiaciones con carga .

Los contadores que se utilizan generalmente en la detección de la radiación , se dividen de acuerdo a la forma de detectar a la radiación recibida en instrumentos que registran a la radiación por medio de la ionización de un gas como la cámara de ionización , el contador proporcional , el contador Geiger - Muller ó por medio de una ionización indirecta como el contador de centelleo ó por medio de una ionización directa como en el caso de un sólido fotoconductor .

CAMARA DE IONIZACION (16).- La cámara de ionización se utiliza para detectar rayos X y gammas .

La parte funcional de este aparato contiene un gas a presión atmosférica , un ánodo y un cátodo . La radiación atraviesa la cavidad ionizando el gas y debido al potencial que existe entre las placas hay movimiento de los iones , los cuales realizan ionización secundaria .

En algunos casos la diferencia de potencial es mantenida por una fuente externa de poder . La corriente entre las placas (originada en la cámara) puede ser medida y este valor es proporcional a la cantidad de energía depositada en la cámara . La corriente puede ser amplificada y medida ó colectada en un condensador de capacidad conocida .

Entre mayor sea la cámara mayor será la sensibilidad del sistema , pero mayor será el voltaje de operación . El uso principal de la cámara de ionización es para altos niveles de intensidad , dada su baja sensibilidad aumentando así su capa-

idad para medir las radiaciones a mayor dosis ó índices de exposición ,ya que los aparatos de gransensibilidad son menos eficaces para medir radiaciones intensas .

CONTADOR PROPORCIONAL (20).-- El contador proporcional es una forma modificada de una cámara de ionización que difiere en dos partes :en el contador proporcional se tiene un electrodo en forma de cilindro hueco y el otro es un alambre que se encuentra en el eje central del cilindro . El voltaje aplicado en el contador proporcional es mucho más alto que el usado en la cámara de ionización . El tamaño del pulso eléctrico con el aumento del voltaje sube a un cierto límite , después de este punto el tamaño del pulso es directamente proporcional al valor de la ionización primaria . La característica proporcional - permite utilizar este detector para diferentes partículas de varias energías .

Una partícula incidente causa ionización del gas en todo el detector , los electrones resultantes de la ionización ganan energía debido al campo aplicado , lo cual , produce -- una avalancha de electrones y el tamaño de ésta es proporcional a la ionización inicial ó a la energía de las partículas , sí el detector se encuentra operando en la región proporcional . Inicialmente si hay n pares de iones y después de m interacciones con otros átomos resultan mn electrones y mn iones positivos , de donde m es llamado el factor de ionización , el valor máximo que alcanza esta multiplicación es de 10^3 .

Los electrones que son atrapados por el alambre central no causan una caída en el potencial porque su efecto es neutralizado por los iones positivos que se encuentran todavía en la

vecindad del alambre y que se mueven lentamente .

Una gran desventaja que presenta el contador proporcional es la necesidad de emplear una costosa fuente de poder , - altamente estable para controlar el voltaje de la cámara en - límites estrechos y así mantener las características propor-- cionales del aparato .

La geometría del aparato proporcional es similar a la del contador Geiger-Muller excepto por el electrodo central - que normalmente es del orden de 1 mm de diámetro , además de que el alambre puede acabar en bola .

Los contadores proporcionales tienen a veces cámaras de placas paralelas y pueden ser usados para medir partículas alfa y neutrones en presencia de rayos X y gamma.

CONTADOR GEIGER-MULLER⁽¹⁾ .- Si el voltaje aplicado a los electrodos de un contador proporcional, se incrementa más allá de la región proporcional, el aparato se denomina contador Geiger-Muller (G. M.). La amplitud del pulso de la señal de salida es independientemente de las ionizaciones primarias. -- Por lo tanto las señales producidas para diferentes energías de las partículas tendrán la misma amplitud. Esta propiedad - hace al contador G.M. lo suficientemente apropiado para la - detección de partículas individuales.

En forma semejante el contador proporcional , el G.M. consiste en un electrodo metálico en forma de cilindro y un - alambre delgado como otro electrodo, trabajando éstos como cátodo y ánodo respectivamente, encerrados en un tubo de vidrio. El tubo es llenado a una presión de 10 cm de Hg con una mezcla de 10% de un vapor orgánico (por ejemplo alcohol etílico)

ó algún halógeno (por ejemplo Cl_2 , Br_2) y 90% de argón.

La ventaja de usar un gas a baja presión en el tubo en lugar de la presión atmosférica como en el caso del contador proporcional, es que la descarga sucede a un voltaje bajo.

Una partícula cargada pasa a través del gas ionizando una molécula, de donde el electrón se dirige al alambre central y el ión positivo al cilindro. Por el campo tan grande - cerca del alambre central los electrones próximos ganan bastante energía cinética y causan la ionización de otras moléculas, los electrones emitidos causan nuevas ionizaciones, en general si el potencial es muy alto (cerca de los 1000 volts) - la multiplicación de iones continúa y una descarga completa - se presenta a todo lo largo del electrodo.

La diferencia de potencial donde empieza a contar se le llama potencial de umbral. Después de un aumento bien definido la razón del conteo permanece casi constante al incrementar el voltaje, a esta región se le llama geiger, si se utiliza el contador en esta región se evita utilizar una fuente de poder altamente regulable lo que es una gran ventaja.

La mayor parte de la descarga registrada por el contador se origina por la ionización fuera de cilindro, pero también en esta señal se registra la información dentro del cilindro y esto contribuye en la pendiente en 1% por cada 100 volts en sentido contrario a la región geiger.

Un gran problema que se presenta en el uso de este contador, es la descarga secundaria que se origina tan pronto como la descarga primaria comienza.

Con el 10% de la mezcla de un gas poliatómico se reduce el efecto no deseado esto se debe a la avalancha de elec-

trones que se realiza en un lugar del electrodo , entonces la descarga no es uniforme a lo largo del alambre y algunos de los electrones son absorbidos y se emiten fotones ,ahora , si los átomos de argón se encuentran únicamente en el tubo , los fotones que llegarán al cátodo , lanzaran electrones , los cuales causaran la avalancha secundaria , pero si existe dentro del cilindro un gas poliatómico éste absorbe los electrones a poca distancia de ser emitidos ésto provoca que el gas quede ionizado y otras avalanchas sean causadas a lo largo del alambre .

El tiempo que transcurre entre dos señales se le llama tiempo muerto y durante este tiempo no registra el contador - las ionizaciones que se realizan el tubo y oscila entre 200 - 4seg a 5 mseg .

Cuando el tubo G.M. se utiliza para rayos gamma y beta se abre el blindaje discriminador , cerrando éste sólo serán contadas las gammas pero el conteo de éstos rayos no será eficiente , aunque es más sensible que la cámara de ionización a esta radiación y a las débiles . El voltaje en el cual se recomienda trabajar se le llama voltaje característico del G.M.

CONTADOR DE CENTELLEO⁽¹⁾.- Ciertas sustancias además de ser ionizadas por la radiación también son estimuladas emitiendo en este proceso luz visible . En sí , el efecto de centelleo es una combinación de fluorescencia y fosforescencia .

El funcionamiento de todos los contadores de centelleo tiene como base la luz visible que emiten los electrones que han sido excitados y regresan a su estado inicial , estos electrones corresponden a un fósforo ó algún cristal de una sustancia capaz de producir luz .

El tubo fotomultiplicador recibe los centelleos luminosos del fósforo que están en contacto con él y los transforma en pulsos eléctricos, los que son después amplificados en ordenes de 10^9 y 10^{10} veces.

Los materiales fosforescentes utilizados para identificar los diferentes tipos de radiación son: ZnS activado con plata para partículas alfa; antraceno recubierto con una hoja metálica (esto impide el paso de partículas alfa) delgada para partículas beta; NaI para registrar rayos X y gammas; por medio de una reacción secundaria a los neutrones que al chocar con el boro emiten alfas y así llegan al ZnS.

El contador de centelleo es un aparato versátil dado los materiales que lo forman y se usa para conocer el número de partículas.

BLINDAJE .- En el diseño de las plantas es necesario tomar precauciones y prevenir exposiciones de radiación al personal además es necesario remover el ozono formado en la atmósfera debido a la presencia de los rayos gamma esto hace necesario un sistema de ventilación, el cual, hará un promedio de 6 cambios del aire de la celda en una hora. Todas las operaciones serán controladas con indicadores agrupados en la consola de control.

Los materiales de construcción⁽¹⁶⁾ que deberán elegirse serán aquellos que tengan la mínima susceptibilidad de contaminación y que sean fácilmente descontaminables y resistan a la corrosión. Existen materiales baratos para usarse una sola vez (desechables) y materiales caros descontaminables de uso permanente. Los materiales convencionales para construcción de los laboratorios químicos son adecuados en aquellos la

laboratorios que usen trazas de material radioactivo .

Los pisos se prefieren de asfalto ó hule vinilo . Las superficies deberán cubrirse con una cera dura seguida por una cera soluble para facilitar la descontaminación . En las paredes y en los techos es adecuado emplear concreto ó madera cubierta de una pintura lavable , dura y no porosa . Es deseable emplear cubiertas que puedan desprenderse si ocurren salpicaduras o condensaciones . Las superficies de trabajo (20) - (bancoas , mesas , etc.) se prefieren de acero inoxidable , pero no es forzoso. Materiales más baratos tales como : la masonita , las cubiertas de resina vinílica son también adecuadas para facilitar la descontaminación de superficies , además se cubren con papel secante ó con hojas de polietileno .

El blindaje constituye uno de los principios más importantes de protección contra las radiaciones . Para aplicar cabalmente los métodos de blindaje deberá de entenderse la expresión matemática que corresponde a la ecuación (5) , que se emplea para calcular fácilmente la intensidad de la radiación - detrás de un blindaje de espesor Δx ó para calcular el espesor del material necesario para reducir la intensidad de radiación a un nivel dado siempre que sea conocido el valor μ . El valor de μ depende sin embargo de la energía de la radiación y del medio de absorción .

Los valores de μ determinados por medios experimentales para todas las energías de radiación y para muchos materiales absorbentes pueden obtenerse de gráficas o tablas ya elaboradas previamente .

Cuanto mayor sea al valor de μ mayor será la reducción de la intensidad para un espesor dado de material . El hecho

de que el plomo posea una μ elevada para radiación X y gamma es la causa por la cual se utiliza ampliamente como material de blindaje .

Si al atenuarse la radiación esta no reúne las condiciones de haz fino y se tratan absorbentes gruesos , la ecuación de absorción se convierte en :

$$I = I_0 b e^{-\Delta x \mu}$$

donde b es el factor de acumulación que toma en consideración la intensidad de la radiación , debido a la radiación dispersa dentro del material absorbente .

Al construirse el blindaje debe tomarse en cuenta :

i) Que las personas fuera de "sombra" proyectada por el blindaje no están necesariamente protegidas .

ii) Que una pared ó biombo no es necesariamente seguro para las personas que se encuentran tras de ella .

iii) La radiación puede "rebotar" en las esquinas - es decir pueden ser dispersadas , siendo este punto muy importante .

La radiación dispersa se presenta cuando un medio absorbente se encuentra dentro del haz de radiación . El absorbente actuará luego como una fuente de radiación . Frecuentemente las paredes , pisos y otros objetos sólidos ubicados cerca de un punto de radiación producen una dispersión apreciable . Al utilizarse en estas condiciones una fuente puntual no se podrá emplear la ley del cuadrado inverso para computar a cualquier distancia la intensidad de la radiación . Por esta razón se hace necesaria la medición de la radiación a fin de determinar la exposición potencial de cualquier punto .

El blindaje atenúa la radiación beta , siendo pequeño

el espesor necesario para detenerla completamente . En la práctica se emplea una cantidad suficiente de blindaje capaz de producir una absorción completa . La emisión de betas de baja energía por una solución son absorbidas completamente por el recipiente de vidrio que la contiene . En muchas ocasiones el blindaje plástico no sólo es efectivo sino conveniente .

La absorción de elevadas cantidades de radiación beta da como resultado la producción de otra radiación electromagnética " el bremsstrahlung " debiendo considerarse esto en el cálculo del blindaje . Los principios seguidos en la atenuación de gammas y rayos X puede seguirse en el blindaje de esta radiación adicional .

Existen tablas que nos dan los alcances máximos de las partículas beta de distintas energías en diferentes medios absorbentes que se pueden utilizar para calcular el blindaje .

Para el blindaje se utiliza generalmente el concreto y el plomo , el plomo es generalmente empleado para la construcción del cuarto en donde se encuentra la fuente y el cuarto de control , como también los transportadores móviles . La tabla 5 nos da los espesores de los materiales utilizados en el blindaje , donde la razón de dosis decrece por un factor de 10 , 10^3 , 10^6 .

Para la protección del personal se construyen laberintos en la entrada y salida de la celda de irradiación . Varias bandas a 90° del sistema transportador son empleados para reducir los niveles de radiación hasta llegar a los niveles de seguridad requeridos . En la tabla 6 se observa la penetración de los rayos gamma en diferentes materiales .

FACTOR DE ATENUACION MATERIAL	10	10^3	10^6
Plomo (d; 10.8)	5	13.3	25.4
Fierro (d : 7.85)	9.2	22.8	41.6
Concreto denso (d : 3.4)	20	51	92
Concreto ordinario (d : 2.3)	32	75	135
Agua	70	145	850

TABLA 5 .- Factores de atenuación . El espesor esta dado en cm. del material , para deerecimientos de la razón de dosis . La densidad esta dada en g/cc .

ENERGIA DE LAS GAMMAS	ESPESOR APROXIMADO (cm)		
(Mev)	PLOMO	CONCRETO	AGUA
	(cm.)	(cm.)	(cm)
0.5	0.5	2.2	5
1.0	1.0	4.3	10
1.5	1.5	6.5	15
2.4	2.0	8.6	20

TABLA 6 .- La penetración de las gammas en varios materiales .

III.- USO DE PELICULAS DE CELOFAN AZUL COMO DOSIMETRO SECUNDA RIO EN PROCESOS DE IRRADIACION INDUSTRIAL.

El objetivo del presente trabajo es desarrollar y experimentar un dosímetro industrial de material nacional y comparar los resultados obtenidos con los de un dosímetro extranjero.

Cuando se realizan experimentos con radiaciones, es necesario conocer los cambios biológicos y químicos que sufren los materiales por la radiación, para lo cual, es necesario realizar mediciones cuidadosas de la radiación absorbida por el material por medio de dosímetros biológicos y químicos.

En altas dosis ($10^5 - 10^7$ R) los dosímetros químicos presentan los mejores resultados en la medición de la exposición (tabla 4). Entre este tipo de dosímetros se encuentra el celofán azul, que es fabricado para diversos usos comerciales.

La Compañía Du Pont fué la primera en emplear al celofán azul como dosímetro⁽²¹⁾ encontrando en él las ventajas -- de costo, maniabilidad, exactitud, estabilidad en el color, -- relativamente insensible al PH, a la luz y al calor por las cuales se prefieren sobre otros materiales.

Las conclusiones a las cuales llegaron después de emplear este celofán como dosímetro los investigadores de la Du Pont fueron:

- i) La decoloración originada por la radiación es un proceso irreversible que no varía con el tiempo.
- ii) No presentan cambios ópticos apreciables por envejecimiento de hasta 2 años de almacenamiento.
- iii) Los cambios debido al color se presentan a temperaturas superiores a los 60° C, por períodos mayores a la lo horas.
- iv) Las características ópticas y físicas, son satisfactoriamente uniformes para ser usado como dosímetro químico.
- v) La transmitancia de las películas de celofán azul no varía mucho de película a película y no es proporcional al grueso de la película, pero a pesar de ello, el espesor del celofán es controlado hasta milésimas de centímetro.
- vi) El porcentaje de la transmitancia de la película se encuentra en función a la dosis recibida (gamma o electrones); cuando se grafica ésta relación se obtiene una relación lineal

Los efectos químicos de la radiación sobre la celulosa que son semejantes a los del celofán fueron descubiertos a partir de los experimentos de Lawton⁽²²⁾.

Con el objetivo de realizar la comparación entre elementos nacionales y el celofán azul extranjero, se describen cinco experimentos, en los cuales se emplean como variable las características espectrofotométricas de los materiales, en donde la variación en el porcentaje de la transmitancia a una longitud de onda fija, se utiliza como el cambio de una propiedad del material, debido a su exposición a la radiación.

La determinación de la dosis de exposición en las pelí

culas, se realiza mediante la siguiente relación:

$$RE_a = (1/0.877) RD_{sf} ((\bar{Z}/\bar{A})_a / (\bar{Z}/\bar{A})_{sf})$$

donde RE_a es la razón de exposición del aire; RD_{sf} es la razón de dosis de la solución de Fricke; $(\bar{Z}/\bar{A})_{sf}$ es la fracción electrónica para la solución de Fricke, $(\bar{Z}/\bar{A})_a$ es la fracción electrónica para el aire y dado que (3);

$$RE_c = RE_a ((\bar{Z}/\bar{A})_c / (\bar{Z}/\bar{A})_a)$$

donde RE_c es la razón de exposición del celofán y $(\bar{Z}/\bar{A})_c$ es la fracción electrónica para el celofán, entonces

$$RE_c = (1/0.877) \left[(\bar{Z}/\bar{A})_c / (\bar{Z}/\bar{A})_{sf} \right] RD_{sf}$$

donde : $(\bar{Z}/\bar{A})_c = 0.530$ $(\bar{Z}/\bar{A})_{sf} = 0.556$

$$\Rightarrow RE_c = 1.0869 RD_{sf}$$

La razón de dosis fué determinada por medio de la solución de Fricke.

Todas las muestras fueron irradiadas con la unidad Gammacell 200 (Atomic Energy of Canada Limited) propiedad del Centro de Estudios Nucleares U.N.A.M. y fueron leídas en un espectrofotómetro Coleman Hitachi, modelo EPS-3T, descrito en otro trabajo⁽²³⁾, propiedad del Instituto de Física de la U.-N.A.M.

EXPERIMENTO No. 1. DETERMINACION DEL MATERIAL NACIONAL ADECUADO PARA USARSE COMO DOSIMETRO.

Las experiencias realizadas por la Du Pont con el celofán azul demostraron su utilidad en la dosimetrías, por lo cual, nos avocamos a investigar la viabilidad de poder aplicar la técnica a un material nacional.

La búsqueda del material nacional más adecuado a las -

necesidades de la dosimetría, nos llevó a observar a los siguientes:

i) Celofán azul producido por la Celanese Mexicana S.A. con clave de producción 300 MSTC-36 con espesor de 0.25 mm.

ii) Celofán azul producido por Milori S.A. con clave de producción C.A. y espesor 0.026 mm.

iii) Celofán rojo producido por Milori S.A. con clave de producción PUT y cuyo espesor es de 0.046 mm.

iv) Acetato azul producido por Milori S.A. con clave de producción AA y el espesor es 0.027 mm.

Método experimental.- Se cortan los materiales en tiras de 2.5 x 3.0 cm., obteniendo de cada material 18 muestras de las cuales se irradian 17 a una dosis de absorción de 5.96 MR.

Las muestras ya irradiadas se colocan en un contenedor de aluminio (tiene un orificio en el centro de 1 x 0.5 cm.) del espectrofotómetro y teniendo como referencia la muestra patrón (sin irradiar) se obtienen los espectrofotogramas mostrados en las figuras 13, 14 y 15, que permiten determinar en que longitud de onda el material irradiado presenta una mayor variación en el porcentaje de la transmitancia.

La respuesta en el infrarrojo (figura 13) es poco uniforme para todos los materiales, por ello se desecha la idea de utilizar una longitud de onda en este intervalo. En el ultravioleta (figura 14) la respuesta a la radiación recibida por parte de los materiales es pobre. La respuesta más acorde con las necesidades experimentales se encontró en el visible (figura 15), de las películas nacionales, la que dio una respuesta más acentuada a la radiación recibida fué el celofán

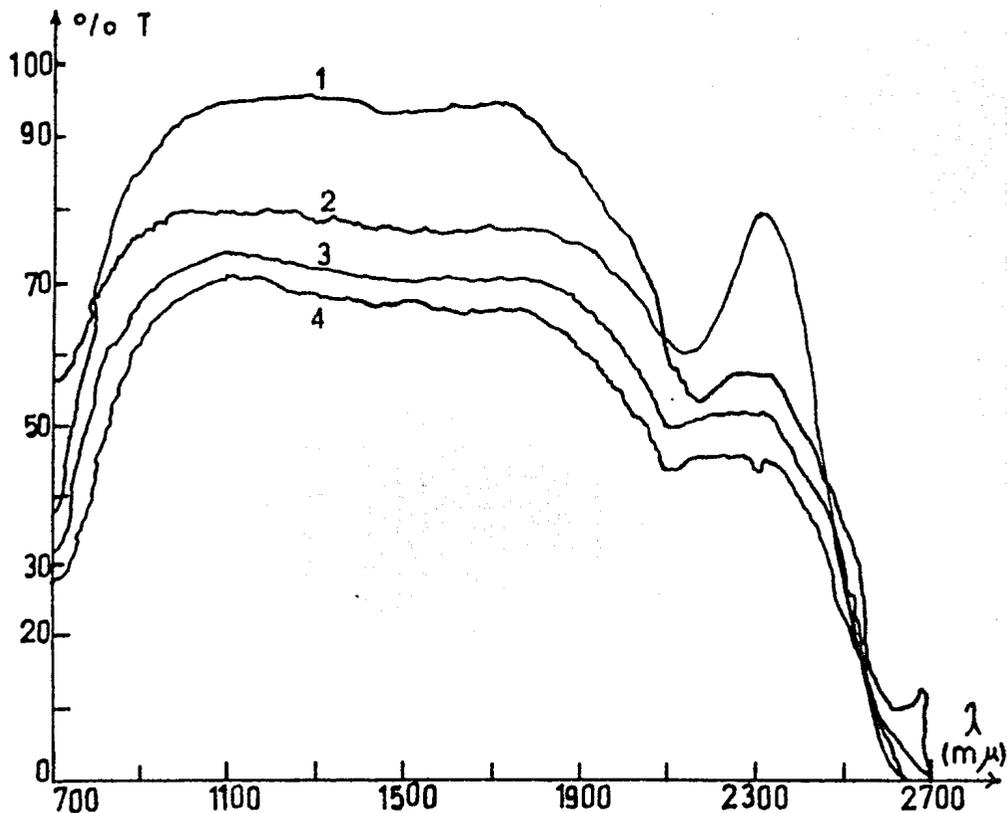


FIGURA 13 .- Espectrofotograma de los materiales investigados de origen nacional teniendo como referencia una muestra del mismo material sin irradiar , en el intervalo del infrarrojo . 1.- Celofán rojo . 2.- Celofán azul de la Celanese Mexicana . 3.- Celofán azul de Milori . 4.- Acetato azul .

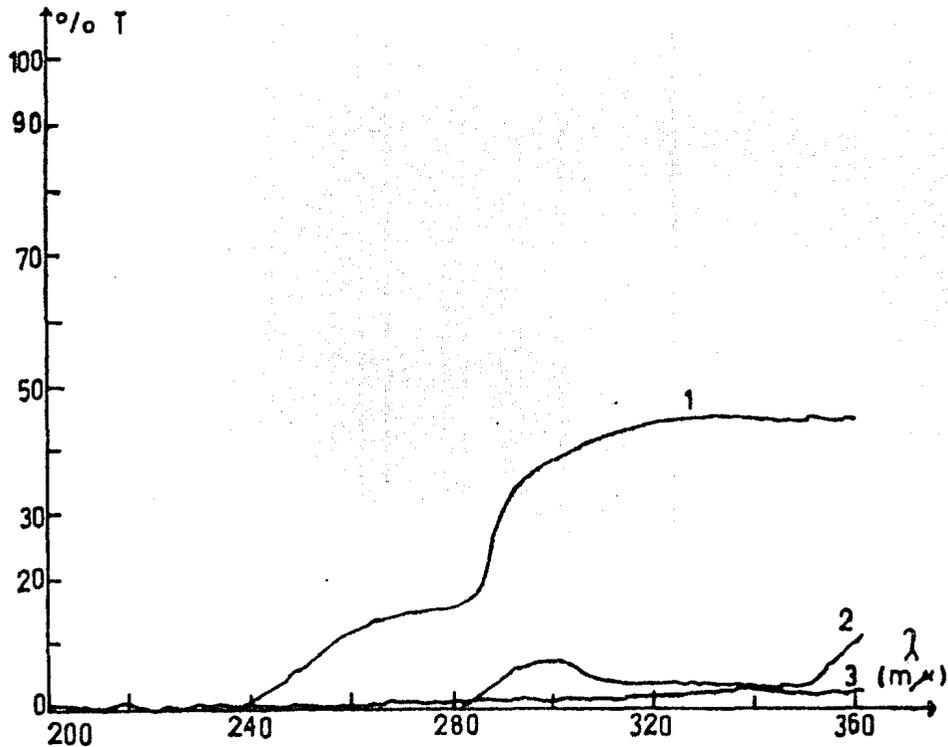


FIGURA 14 .- Espectrofotograma de los materiales investigados de origen nacional teniendo como referencia una muestra del mismo material sin irradiar , en el intervalo del ultravioleta . 1.- Celofán azul de Celanese Mexicana , 2.- Celofán azul de Milori . 3.- Acetato azul . 4.- el celofán rojo no da un valor diferente de cero en todo el intervalo por ello no se dibuja .

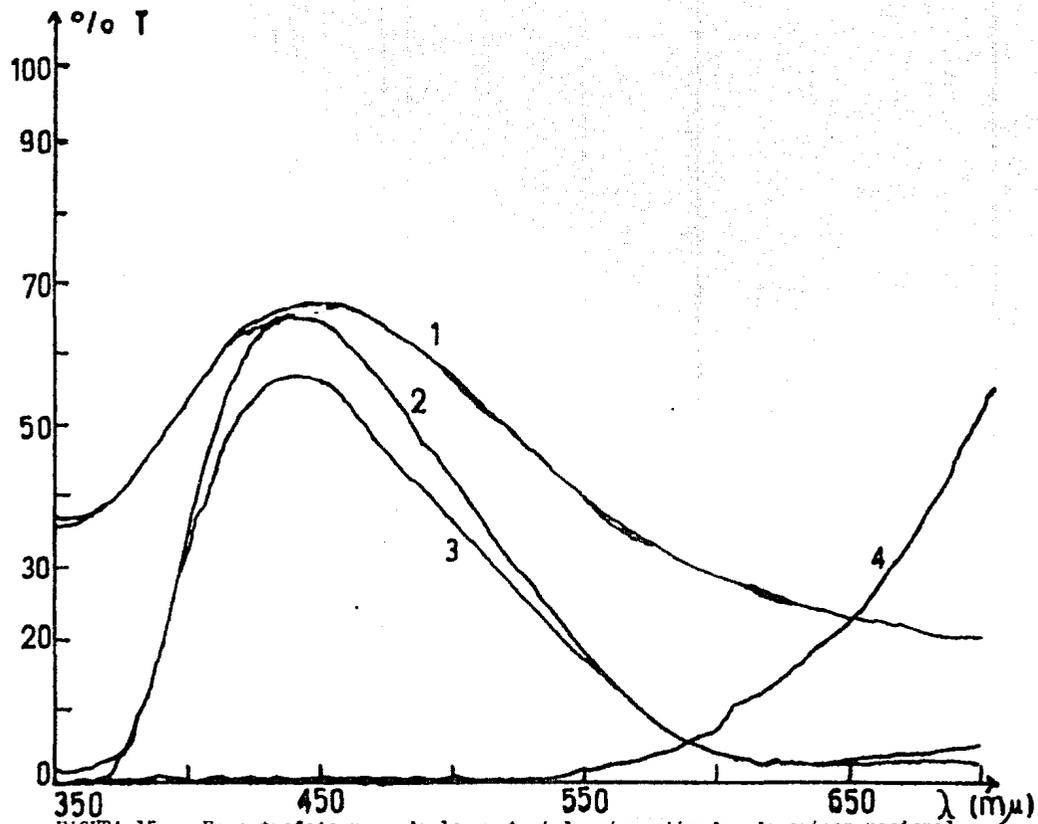


FIGURA 15 .- Espectrofotograma de los materiales investigados de origen nacional

tomando como referencia una muestra del mismo material sin irradiar ,en el intervalo del visible . 1.- Celofán azul de la Celanese Mexicana . 2.- Celofán azul de H. Iori . 3.- Acetato azul . 4.- Celofán rojo .

azul producido por Celanese Mexicana S.A., lo que nos permite escoger este material como el que más se asemeja al producto empleado por la Du Pont.

Al realizar la misma experiencia con el celofán azul - producido por Helen Cole Gift Wraps and Decorations de E.U.A. Se encontró también que la respuesta cae en el visible.

EXPERIMENTO No. 2. OBTENCION DE LA LONGITUD DE ONDA.

a) Este experimento se realizó con el fin de encontrar en que longitud de onda se observa la mayor respuesta a la dosis recibida por el celofán azul producido en la Celanese Mexicana, S.A.

Se colocan 17 tiras de celofán azul en el Gammacell y se irradian a una exposición de $5.96 \times 10^6 R$, posteriormente se lee su transmitancia empleando como referencia una muestra del mismo material sin irradiar y así obtenemos el espectrofotograma del intervalo visible (figura 16), en el cual se observa que la mayor respuesta se encuentra en 6800 \AA , valor - que se empleará en la calibración de la curva determinada por la transmitancia y la dosis recibida.

b) Tratandose de obtener la longitud de onda, donde de la respuesta a la dosis recibida sea mayor, se emplea para el celofán azul extranjero, el mismo método experimental.

Al observar el espectrofotograma (figura 17) obtenido en este experimento donde se irradiaron las 17 muestras a $5.96 \times 10^6 R$, se obtiene en 6800 \AA la mayor variación en el porcentaje de transmitancia .

EXPERIMENTO No. 3. OBTENCION DE LAS VARIABLES EN LAS LECTURAS

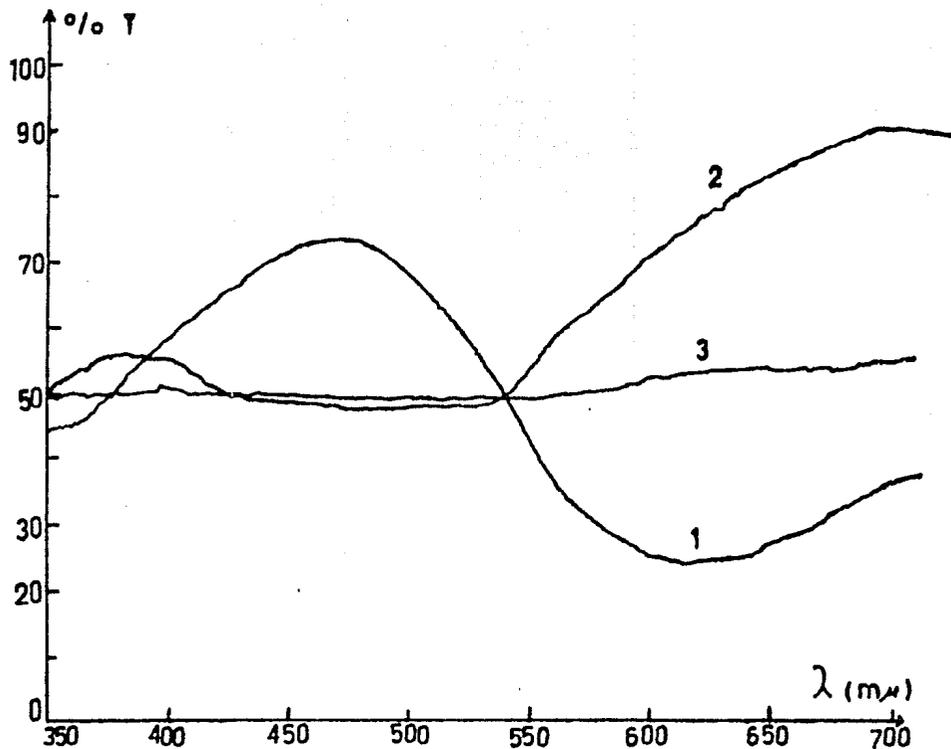


FIGURA 16 .- Se muestra el espectrofotograma obtenido del celofán azul nacional - irradiado en el intervalo del visible teniendo como referencia una muestra del material sin irradiar (2) . Cuando se uso como referencia el aire se obtuvo la traza marcada con (1) . La línea central (3) se calibro con el origen . Se observa - que la mayor respuesta es para el caso (2) y dentro de ésta se encuentra en 6 800 Å la mayor respuesta .

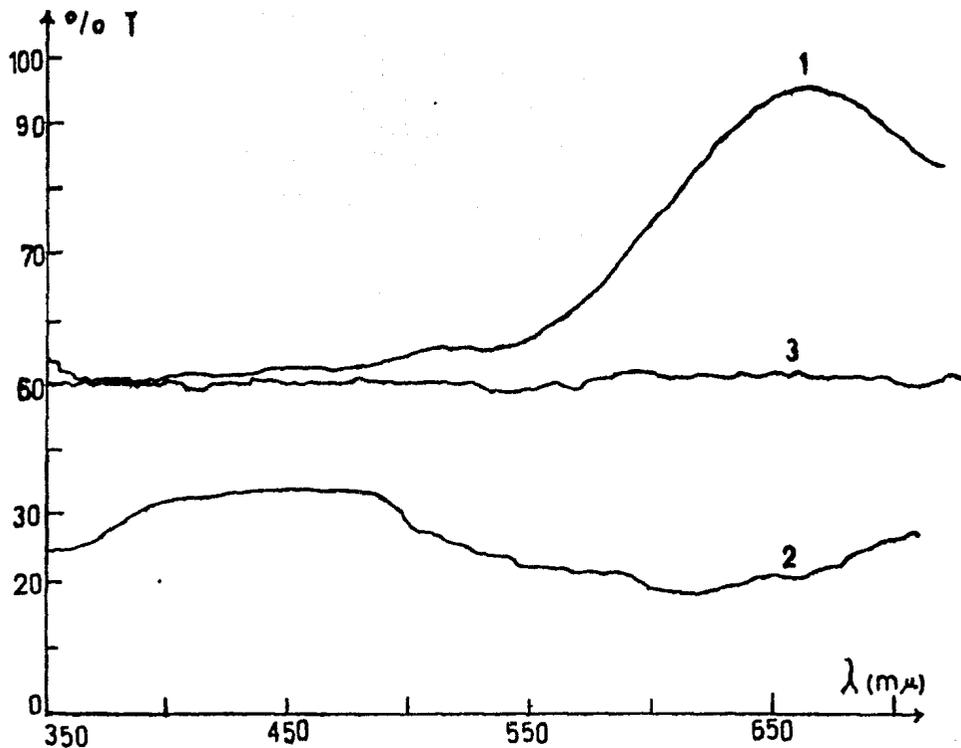


FIGURA 17. — Se muestra el espectrofotograma obtenido del celofán azul extranjero irradiado en el intervalo del visible teniendo como referencia una muestra del mismo material sin irradiar (1). Cuando se usó como referencia el aire se obtuvo la traza baronda con (2). La línea central (3) se calibró con el origen. Se observa que la mayor respuesta es para el caso (1) y dentro de ésta se encuentra en $6\ 600\ \text{Å}$ la mayor respuesta.

ESPECTROFOTOMETRICAS .

a) Para observar si existen variables que afecten la lectura espectrofotométrica del celofán azul nacional irradiado se realizaron las siguientes pruebas con 17 muestras irradiadas a 5.96 MB teniendo como referencia una muestra sin irradiar .

i) Se varía el ángulo de inclinación del celofán azul respecto a la incidencia del haz . Se observa que la -- lectura disminuye con respecto a su valor inicial hasta llegar a los 40° donde alcanza su valor mínimo y a continuación empieza a aumentar hasta alcanzar un valor aproximado al inicial a los 70° .

ii) Girando el celofán azul 180° en su eje cenital se nota que la transmitancia disminuye en 3 % .

iii) Girando el celofán azul 180° con respecto a su eje azimutal , se observa que la transmitancia disminuye en 2 % su valor inicial .

iv) Disminuyendo la separación del celofán azul -- irradiado a la fuente de luz , la transmitancia disminuye 3 % hasta llegar a 2 cm donde sube a un valor casi igual al inicial .

v) La transmitancia leída en el centro de la tira es mayor que la de los extremos . De esta forma se observa la falta de uniformidad en la decoloración del celofán azul producido por la Celanese Mexicana S.A. .

Los anteriores experimentos sugieren que las lecturas se lleven a cabo manteniendo perfectamente vertical y sin girar a las muestras .

b) Para el celofán azul extranjero producido en -

Los Angeles California , E.U.A. , se repitieron las mismas - pruebas que para el celofán azul nacional obteniendose los siguientes resultados :

- i) La lectura de la transmitancia disminuye .
- ii) No varía el valor de la transmitancia .
- iii) No hay variación en la transmitancia .
- iv) La lectura de la transmitancia disminuye .
- v) La lectura del centro es mayor que la de los - extremos .

Para el celofán azul producido en E.U.A. , la decoloración es uniforme y la lectura sólo requiere que no sea inclinada .

EXPERIMENTO No. 4 . EFECTOS POST-IRRADIACION .

Para obtener la variación de la decoloración en el tiempo y con la temperatura se hizo lo siguiente :

a) Se irradiaron 17 muestras de celofán azul nacional a una dosis de 15.39 MR .

Se leyó la transmitancia de las muestras al salir del irradiador , posteriormente se colocaron 6 muestras a 30° C , 5 a 6 °C y 6 a temperatura ambiente (aproximadamente a 20 °C) leyendose la transmitancia cada 24 horas durante 7 días y se llegó al resultado de que :

i) Las lecturas de la transmitancia del celofán - azul nacional dejadas a temperatura ambiente , fueron mayores a las lecturas iniciales pero sin presentar uniformidad . A los tres días se empezó a estabilizar el valor de la transmitancia a un valor un poco mayor al inicial .

ii) Las muestras a 30 °C , presentaron inicialmente un pequeño aumento en la transmitancia durante las primeras

24 horas , pero regresaban a su valor inicial a los tres días

iii) Las muestras dejadas a 6 °C presentaron una --
disminución en la transmitancia durante las primera 24 horas
pero después aumento su transmitancia hasta llegar casi al va
lor inicial .

b) Haciendo lo mismo para el celofán azul de los
Angeles California , E.U.A. , para los tres casos el valor de
la transmitancia es casi igual al inicial a partir de las pri
meras 24 horas después de ser irradiado .

Como se puede ver con respecto a la temperatura el celo
fán extranjero es mejor que el nacional ;esto se puede remediar
leyendo la transmitancia a los 3 días de ser irradiado .

EXPERIMENTO No. 5 . CALIBRACION DEL DOSIMETRO .

a) Este experimento tiene como fin obtener la cur
va de calibración de dosis , teniendo como variable el % de la
transmitancia .

Para lograr la curva se cortaron 17 tiras de celofán -
azul nacional en las condiciones que se describen en los expe
rimentos anteriores y se irradiaron a dosis que se encuentran
en el intervalo de 0.5 a 17 MR , las dosis a las cuales se ex
pusieron las tiras van de 0.5 en 0.5 MR . Las tiras se deposi
taron el láminas de polietileno al ser irradiadas en el Gamma
cell 200 ; después se mantuvieron en condiciones normales de
temperatura y presión durante tres días , fecha en la cual se
leyó la transmitancia , originando así la figura (18) y la ta
bla 7 .

b) Se realizo la misma experiencia en 17 tiras de
material extranjero y tras de leer sus valores de transmitancia

en el espectrofotómetro se obtuvo el valor promedio de las 17 muestras para cada dosis de absorción obteniendo la figura 10 y la tabla 8 .

La película nacional de celofán azul elaborada por la Celanese Mexicana S.A. con clave de producción 300 MSTC 36 - presentó las siguientes características :

i) Mayor decoloración de la película .

ii) Respuesta acentuada a la dosis de radiación .

La película de celofán azul elaborado por Helen Cole - Grift Wraps and Decoratives de los Angeles California , E.U.A. presento las siguientes características :

i) Menor decoloración de la película en comparación con el producto nacional .

ii) Respuesta menos acentuada que el material nacional a la dosis de absorción .

Por lo tanto ya que la respuesta es más acentuada en el producto nacional y la curva de calibración nos dá el intervalo (0.5 - 17 MR) en el cual, es útil para usarse como dosímetro , podemos recomendar este producto , tomando en cuenta los resultados de este trabajo experimental , así como su bajo costo que permite usarlo a nivel industrial .

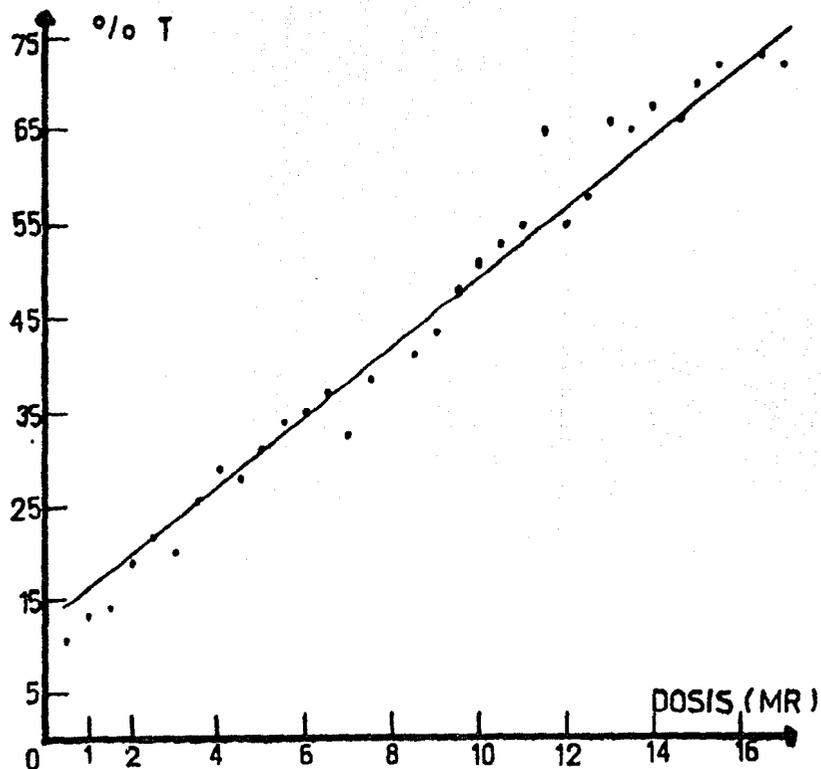


FIGURA 18 .- Relación entre la dosis y el % de la transmitancia de películas irradiadas con fuentes de Cobalto 60 ; el porcentaje de la transmitancia se determinó a una longitud de onda en el espectrofotómetro de 6 800 Å , empleando como referencia una película del mismo material sin irradiar .

TRANSMITANCIA	DOSIS	TRANSMITANCIA	DOSIS
%	MR	%	MR
10.5	0.5	43.5	9.0
13.0	1.0	48.0	9.5
14.0	1.5	51.0	10.0
19.0	2.0	53.0	10.5
21.5	2.5	55.0	11.0
20.0	3.0	65.0	11.5
25.5	3.5	55.0	12.0
29.0	4.0	58.0	12.5
28.0	4.5	68.0	13.0
31.0	5.0	65.0	13.5
34.0	5.5	67.5	14.0
35.0	6.0	66.0	14.5
37.0	6.5	70.0	15.0
32.5	7.0	72.0	15.5
38.5	7.5	71.5	16.0
42.0	8.0	73.0	16.5
41.0	8.5	72.0	17.0

TABLA 7 .- Valores obtenidos experimentalmente para el celofán azul nacional al ser irradiado en el intervalo de 0.5 a 17.0 - MR. .

La recta de la figura 18 se obtuvo por un ajuste de mínimos cuadrados ; siendo el valor de la pendiente m de $m=3.690$ y la ordenada al origen $b = 12.53$. La desviación estandar es $S_y = 3.033 \%$, esto se obtuvo de $S_y = (\sum (\delta y_i)^2 / 2 - 2)^{1/2}$ donde δy_i es la diferencia en la transmitancia experimental y la obtenida para la recta de la figura 18 a una dosis dada y n es el número de puntos experimentales de la misma figura .

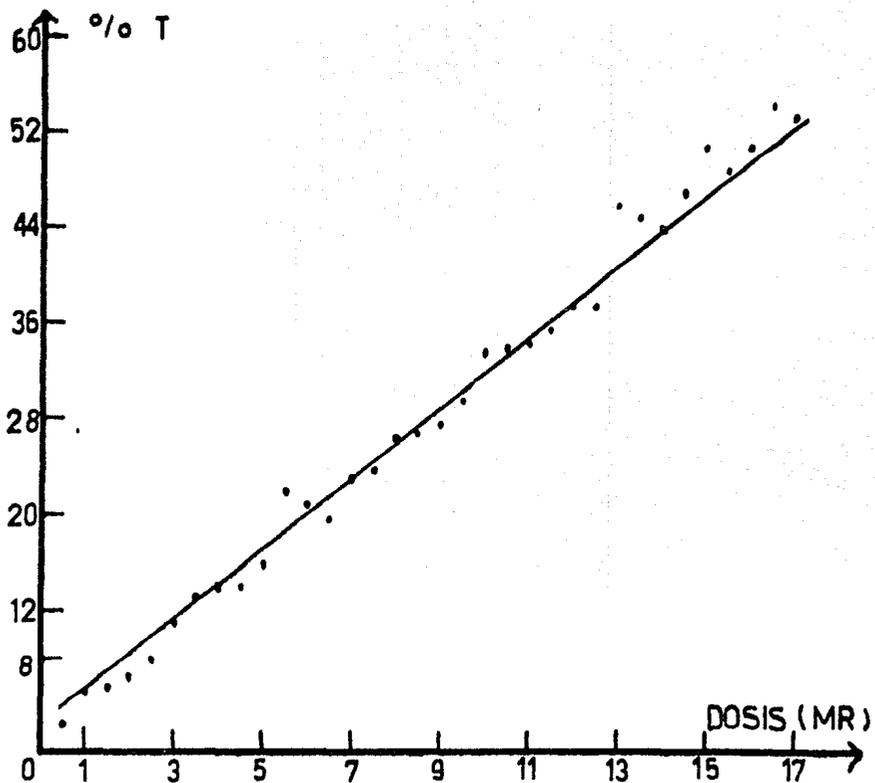


FIGURA 19 .- Relación entre la dosis y el % de la transmitancia de películas irradiadas con rayos de Cobalto 60 ; el % de la transmitancia se determinó a una longitud de onda de $6\ 600\ \text{\AA}$ empleando como referencia una película del mismo material sin irradiar .

TRANSMITANCIA	DOSIS	TRANSMITANCIA	DOSIS
%	MR	%	MR
2.5	0.5	27.5	9.0
5.0	1.0	29.5	9.5
5.5	1.5	33.5	10.0
6.5	2.0	34.0	10.5
8.0	2.5	34.5	11.0
11.0	3.0	35.5	11.5
13.0	3.5	37.5	12.0
14.0	4.0	37.5	12.5
14.0	4.5	46.0	13.0
16.0	5.0	45.0	13.5
22.0	5.5	44.0	14.0
21.0	6.0	47.0	14.5
19.5	6.5	51.0	15.0
23.0	7.0	49.0	15.5
23.5	7.5	51.0	16.0
26.5	8.0	54.5	16.5
27.0	8.5	53.5	17.0

TABLA 8.- Valores obtenidos experimentalmente para el celofán azul extranjero al ser irradiado en el intervalo de 0.5 a 17.0 MR. .

La recta de la figura 19 se obtuvo por un ajuste por mínimos cuadrados ; siendo el valor de la pendiente de $m = 2.9601$ y la ordenada al origen $b = 2.584$. La desviación estandar es $S_y = 1.845\%$, se obtuvo de $S_y = (\sum (\delta y_i)^2 / n - 2)^{1/2}$ donde δy_i es la diferencia entre la transmitancia experimental y la obtenida para la recta de la figura 19 en una dosis dada y n - es el número de puntos experimentales de la misma figura .

CONCLUSIONES

El celofán azul nacional es recomendable para uso industrial en altas dosis de radiación, en la etapa del control de calidad siempre y cuando se tenga controlada la temperatura bajo la cual se usa. Quedando garantizados estos resultados por la presente tesis.

BENEFICIOS Y LIMITACIONES DEL PROCESO DE IRRADIACION DE ALIMENTOS.

Los principales beneficios de la tecnología de irradiación de alimentos son:

- a) Reducción de las pérdidas de alimentos post-cosecha, en el almacenaje y en la distribución.
- b) Extensión de la vida media de los alimentos -- propensos a pudrirse y mantenimiento de su calidad.
- c) La eliminación de organismos perjudiciales a los alimentos.
- d) Un amplio espectro de aspectos benéficos se logra con un gran número de productos alimenticios.
- e) Puede ser aplicado el proceso a través de los empaques.
- f) El tratamiento de irradiación, no causa un significativo aumento en la temperatura del producto.
- g) Los efectos deseados son logrados inmediatamente al absorber la cantidad de radiación ionizante requerida.

h) Por la posibilidad de seleccionar el apropiado tipo de radiación pudiendo ser tratados alimentos de más de 60 cm. de espesor.

i) En algunos casos, la radiación es una alternativa al tratamiento químico y puede ofrecer ciertas ventajas.

Las presentes limitaciones de esta tecnología son:

a) Las necesidades generales de costo y tiempo, - requeridos en el estudio que se realiza de cada alimento.

b) Generalmente, el alto costo inicial, para aplicar la irradiación.

c) El público se muestra renuente a comprar alimentos procesados por irradiación.

d) Algunos alimentos son extremadamente sensibles a la irradiación e inducen cambios organolépticos.

e) La mayoría de las enzimas y virus son resistentes a la radiación.

Estas consideraciones son generalmente aplicadas, para todo tipo de tratamientos con radiación.

La irradiación de alimentos no es simplemente una aplicación pacífica más de la energía nuclear. El camino que va desde un experimento con éxito en el laboratorio hasta la venta de compras de una ama de casa, pasando por el funcionamiento de una planta piloto, ha demostrado ser más complicado de lo que se creía. En los países en desarrollo, en donde la conservación de tipo convencional no está totalmente implantada, los beneficios de este nuevo procedimiento pueden materializarse muy pronto.

Un sistema de implantación gradual de los alimentos irradiados estimulará a la industria a ensayar la viabilidad

de este proceso y con ello incrementar la demanda de alimentos irradiados.

Países como Holanda, Bélgica y Rusia pueden ayudar a convencer a los demás países de la seguridad y de las ventajas del nuevo método utilizado en todos los empaques que contienen estos alimentos irradiados el escudo representado en la figura 20.

La utilización de la radiación en la esterilización de productos desechables de uso médico y farmacéutico constituye una técnica que se está generalizando en el mundo por las ventajas que presenta en comparación con las técnicas convencionales que se aplican actualmente.

La dosis de esterilización que se aplica en los productos desechables varía de un país a otro. Esto se debe básicamente al tipo de contaminación previo a la irradiación y a las normas dictadas por los Departamentos de Salud Pública de cada país.

Las ventajas de utilizar la radiación con respecto a otros métodos son:

- Excelente e instantánea penetración en los productos por esterilizar:

- Un pequeño aumento de temperatura a la dosis de esterilización normal, permitiendo el uso de materiales termosensibles los cuales no pueden ser esterilizados por métodos térmicos.

- Fácil control por métodos físicos y mecánicos - dando así un alto grado de consistencia a los datos obtenidos

En la mayoría de las ocasiones los productos farmacéu-

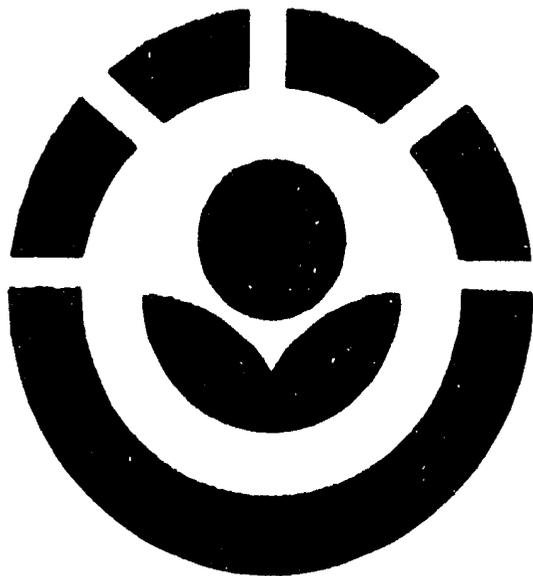


FIGURA 20 .- El símbolo de la irradiación de alimentos (para alimentos agrícolas), es una ver-
dura encerrada en un círculo irradiado por rayos penetrantes.

ticos deben encontrarse totalmente estériles. Una de las primordiales ventajas que presenta la esterilización por medio de la radiación es el esterilizar los productos en sus envases definitivos. De esta forma el interior del envase y el producto quedan esterilizados al mismo tiempo.

Por ésto no es necesario mantener las condiciones rigurosas de asepsia en el curso del montaje del producto en su envase. En general, ello provoca que el montaje lo pueda realizar una máquina automática.

Entre los países que ya emplean este sistema se encuentran:

- a) Los Estados Unidos
- b) El Reino Unido
- c) Checoslovaquia
- d) Dinamarca
- e) Hungría
- f) República Federal Alemana
- g) U.R.S.S.
- h) Francia
- i) Países Bajos

En México el Instituto Nacional de Energía Nuclear (INEN), ha adquirido un irradiador de Cobalto 60 HS-6 500 de la Compañía Atomic Energy of Canada, Ltd; que se instala en el Centro Nuclear de Salazar, con el propósito de iniciar la aplicación a escala industrial de la esterilización de productos médico-desechables producidos por empresas privadas que cubren el mercado nacional y donde se usará el celofán azul como dosímetro.

Esta aplicación estimulará el desarrollo de las aplicaciones de la irradiación en nuestro país, iniciada desde hace algunos años por el grupo conjunto del programa de tecnología del INEN y el Instituto de Física de la U.N.A.M., en el cual se desarrollo la presente tesis.

B L I B L I O G R A F I A

- 1.- Beiser , Arthur ; Conceptos de Física Moderna ; Mc. Graw Hill , 1965 , Capítulo 7 - 13 , (160 - 353) .
- 2.- E. Segre ; Nuclear Physics and Nuclear Practicals , John Wiley and Sond , New York , Caps. I - II .
- 3.- Atam P. Arya ; Fundamentals of Nuclear Physics ; Allynan Bacon Inc , 1970 , U.S.A. ; Caps 2, 8 , 9 .
- 4.- L. Kats y A.E. Penfold ; Ev. Mod. Phys. 24 , 28(1952) .
- 5.- J.W.T. Spinks , "J. Woods , " An Introduction of Radiation Chemistry " ; John Wiley & Sons Inc. U.S.A. , 1970 - Cap. 3 .
- 6.- Maurice de Proost ; " Food Irradiation Technology " ; Proceedings a Seminar , Trombay January 13 - 14 ,1969 ; Bhabha Atomic Centre ; Bombay India , 1969 ; pp 43 - 68 .
- 7.- F. Shauwaert , P.P. Tobbak , A. Anthonissen ; " Influence Gamma Irradiation on the Provitamin A (Carotene) in solution " ; Proceedyng of a Symposium , Bombay 13 - 17 ; November 1972 ; Radiation Preservation of Food ; I.A.E.A. ; Vienna 1973 ; STI/PUB/317 ; pp. 29 - 46 .
- 8.- George R Deitz ; Facilities Supporting A.E.C. Food Irradiation Research , Proceeding of an International Conference Boston , September 27 - 30 , 1964 ; Radiation Preservation of Food ; U.S.A.E.C. y U.S.A.R.L. , 1965 ; pp 303-313 .
- 9.- O.A. Kuhl ; Review of the ⁶⁰Co. Source Development Program at Brookhaven National Laboratory ; Proceedings of a Sym

- posium , 6 - 10 June 1966 ; Food irradiation I.A.E.A. : Vienna , 1966 , STI/PUB/127 ; pp. 35 - 53 .
- 10.- V.K. Iya , A.C. Eapen , K. Krishnamurthy ; "Applications of Radioisotopes and Radiation Source in Industry ; Radiation Proceedings and Hidrology " ; Proceedings of the Fourth International Conference , Geneve 6 - 16 September 1971 ; I.A.E.A. ; Vienna 1972 , STI/PUB/ 300/vol. 14 ; pp.3 - 18 .
- 11.- M.G. Brawn ; The relation of Dising Parameters , Plant Capacity and Processing Costs in Cobalto 60 Sterilization - Plants " ; Proceedings os a Symposium , Budapest 5 - 9 - June 1967 ; Radiosterilization of Medical Products ; I.A.E.A. , Vienna 1967 , STI/PUB/157 , pp. 381 - 394 .
- 12.- E.E. Foesler ; " United States Atomic Energy Commission Radiation Proceeding of Food Program" ; Proceedings of Symposium ,Karlsruhe , 6 - 10 June 1966 ; Foods Irradiation I.A.E.A. , Vienna 1966 , STI/PUB/127 ; pp. 655 - 671 .
- 13.- K.F. Mac Queen ; Some consideration which Influence the Economic Feasibility of Food Irradiation " ; Proceedings of Panel a Vienna ,14 - 18 June 1971 ; Factors Influencing the Economical Application of Food Irradiation ; I.A.E.A. Vienna 1973 STI/PUB/331 , pp. 1 - 13 .
- 14.- S. Jefferson ; " High - Energy Electron and Gamma Radiation Plant - Desing Construction and Economics " ; Karlsruhe - 6 - 10 June 1966 STI/PUB/127 , pp. 21 - 33 .
- 15.- S. Jefferson ; " Gamma Radiation Sources of the Technological Irradiation Group U.K.A.E.A. " , Proceedings of a Conference ; Large Radiation Sources in Industry; I.A.E.A. , Vienna 1960 ,STI/PUB/12 /vol,I , pp. 179 - 187 .
- 16.- Principios básicos sobre la protección radiológica a trabajadores profesionistas Expuestos ; C.N.E.N. ; 1967 .

- 17.- G. Mared ; " Principles of Radiation Protection " Cliffe Books Ltd. ; Inglaterra 1964 , Caps. 2,5 10 .
- 18.- H.N. Koch ; " Electron Accelerators for Food Processings Proceedings of a Conference , Boston ; September 27 - 30 1964 ; U.S.A.E.C. y U.S.A.R.L. 1965 ; pp. 149 - 181 .
- 19.- Empleo de dosímetros de película para la vigilancia adio
lógica individual . Organismo Internacional de Energía -
Atómica ; Vienna ,1972 ; Colección Seguridad No. 8 .
- 20.- Carl B. Braestrup ; " Radiation Protection " ; Charles C
Thomes Publications , U.S.A. ; Caps. 2,4,9,12 .
- 21.- Manual del curso básico de protección contra las radiacio
nes ionizantes ; United States Departament of Health , E
ducation and Welfare ; 1967 ; Caps. 3,4,5,6,8, 9 .
- 22.- Lawton E.J. ; Science 113 - 380 , (1951) .
- 23.- Roberto Uribe R. ; " Estudios preelminares de Copolimeri
zación de injerto de Metil-Metratilato en Fibras de hene-
quén Mediante la Radiación de Electrones de Alta Energía
1973; Facultad de Ciencias U.N.A.M. .