

CNA/8

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

CENTRAL NUCLEAR EN ATUCHA

"CURSO DE RADIOPROTECCION"

"NIVEL TECNICO"

Eduardo

Ings. E. Diaz y J. A. Recalde

Julio
C.N.A.

Buenos Aires-Argentina

- 1974 -

CNA/8

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

CENTRAL NUCLEAR EN ATUCHA

"CURSO DE RADIOPROTECCION"
"NIVEL TECNICO"

Ings. E. Diaz y J. A. Recalde

C.N.A.

Buenos Aires-Argentina

- 1974 -

CURSO DE RADIOPROTECCION
NIVEL TECNICO

CURSO DE RADIOPROTECCION

NIVEL TECNICO

Contenido

- 1) Concepto fundamental de radioactividad.
- 2) Distintos tipos de desintegración.
- 3) Leyes del decaimiento radioactivo.
- 4) Unidades de radioactividad. Concepto de flujo de radiación.
- 5) Interacción de la radiación con la materia. Exposición. Unidades. Concepto de dosis. Unidades.
- 6) Fisión. Productos de fisión. Su importancia desde el punto de vista radiológico.
- 7) Efectos de las radiaciones.
- 8) Radiación externa y contaminación.
- 9) Elementos de protección contra la radiación externa y contra la contaminación.
- 10) Fuentes de irradiación externa y contaminación dentro de la CNA.
- 11) Formas en que el organismo puede llegar a incorporar los radioelementos.
- 12) Disposiciones de acceso, circulación y salida de la zona controlada.
- 13) Máximos permisibles. Normas y disposiciones.
- 14) Indicaciones, señales y alarmas en la Central. Planes de emergencia.

...///

1 - ELEMENTOS DE ESTRUCTURA ATOMICA

Concepto fundamental de radioactividad.

La materia está constituida por moléculas de distintos elementos. Así por ejemplo el agua está constituida por moléculas que contienen hidrógeno (H) y oxígeno (O), estos últimos componentes fundamentales, se denominan elementos. La mínima expresión de materia de un elemento puro se denomina átomo. Así en el caso del agua, su expresión química es: H_2O , es decir que una molécula de agua está compuesta por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno. A su vez el átomo de hidrógeno se encuentra constituido por un núcleo, donde prácticamente se encuentra concentrada toda la masa y un electrón. El oxígeno en cambio si bien obedece a la misma estructura, contiene un núcleo y ocho electrones (figura 1). En el caso del hidrógeno, la estructura es muy simple dado que el núcleo se encuentra formado por una sola partícula, mientras que en el oxígeno, el núcleo se encuentra integrado por 16 partículas.

El átomo en sí es eléctricamente neutro. Para explicar los fenómenos de ionización y aún otros más complejos que sufre la materia, los electrones exteriores al núcleo son de naturaleza negativa, de manera que el núcleo debe poseer carga positiva y del mismo valor que la carga electrónica. Es así que las partículas cargadas del núcleo son positivas y se denominan protones. El núcleo del hidrógeno se encuentra formado por un protón. En el resto de los elementos la estructura del núcleo es más compleja encontrándose formado, por protones y partículas carentes de carga eléctrica denominadas neutrones (figura 1). La cantidad de protones y neutrones de un átomo (lo que da lugar prácticamente a la masa), se denomina número de masa, simbolizándose con la letra A.

El número de protones, se simboliza con la letra Z. Por lo tanto un elemento queda dado por la expresión,



donde X es el símbolo químico del elemento. Así por ejemplo; el oxígeno:



El hidrógeno se representa por ${}_1^1H$. El helio se escribirá:



ISOTOPOS

En la naturaleza se presentan también elementos que contienen átomos cuyo número de neutrones es diferente, manteniéndose el número de electrones y protones. Estos átomos se denominan isótopos. Así el hidrógeno además de su configuración normal ${}^1_1\text{H}^1$ presenta el isótopo ${}^2_1\text{H}^2$. En la naturaleza este isótopo denominado deuterio es muy poco abundante (0,02 %). El oxígeno posee los isótopos ${}^{16}_8\text{O}^{16}$ y ${}^{18}_8\text{O}^{18}$ con una abundancia porcentual del 0,037% y 0,204% respectivamente. En la figura 2 se representan los elementos originales y los isótopos.

Se denominan isótopos estables a aquellos que no sufren ningún cambio físico en el tiempo, de no mediar energía externa. En la tabla I se indican algunos isótopos estables y su elemento natural. En la figura 3 se han graficado con ■ los isótopos estables. En ordenadas se lleva el número de neutrones (N) y en abscisas el número de protones (Z). Para números de masa pequeños $A \leq 40$ estos nucleidos se encuentran aproximadamente sobre una línea a 45° ($Z \approx N$).

Para valores superiores el número de neutrones supera al de protones ($N > Z$, $\frac{N}{Z} > 1$).

RADIOISOTOPOS

Al aumentar la relación $\frac{N}{Z}$ los isótopos se vuelven inestables,

es decir cambian sus características físicas con el tiempo, se dice entonces que estos son radiactivos o bien se denominan radioisótopos. En la generalidad de los casos existe una tendencia a disminuir el número de neutrones en exceso, transformándose estos en protones y emitiendo "energía de radiación". A este proceso se lo suele denominar desintegración.

Al producirse la desintegración el radioisótopo se va transformando paulatinamente en otro elemento estable. Existen también radioisótopos artificiales creados por el hombre en equipos especiales (laboratorios, reactores etc.).

Los modos de desintegración fundamentales pueden ser α , β o γ o una combinación de ambos. Las características de los mismos será tratada en capítulo siguiente.

2 DISTINTOS TIPOS DE DESINTEGRACION

DESINTEGRACION α

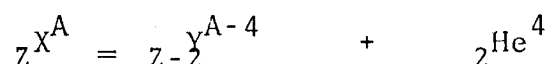
Este tipo de desintegración tiene lugar para los elementos inestables de número atómico elevado (Z superior a 65, en gran parte superiores a 80).

Al desintegrar estos radioisótopos, se ha comprobado que emiten partículas que físicamente son núcleos de helio y tienen carga eléctrica positiva. Un núcleo de helio está constituido por dos protones y dos neutrones (figura 4).

Dado que un radionucleido emisor α , emite dos protones y dos

neutrones (núcleo de helio ó partícula α), el nuevo nucleído que aparece como resultado de la desintegración posee un número atómico Z menor en dos unidades que el núcleo madre. En cambio el nuevo número de masa A resulta inferior en cuatro unidades.

Simbólicamente lo expresado puede representarse así:



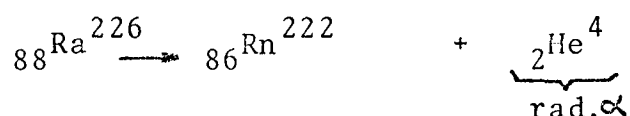
siendo:

${}_Z^X A$ símbolo del nucleído madre

${}_{Z-2}^{Y} A-4$ símbolo del nucleído hija

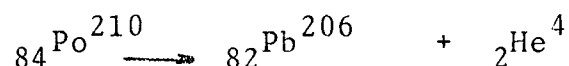
El nucleído hija Y puede aún contener mayor energía que la correspondiente a su estado fundamental. En este caso ocurre además una nueva emisión de energía residual que da lugar a la emisión denominada γ .

El radioisótopo natural radio ${}_{88}^{\text{Ra}} 226$ es inestable emitiendo radiación α según la siguiente nomenclatura:



Si se analiza a lo largo de un determinado tiempo una cantidad de partículas α (N partículas) provenientes de un radioisótopo que desintegra y se mide su energía se comprueba que para un radionucleído dado, la energía de ellas tienen un valor determinado. Se dice entonces que la radiación α es monoenergética. Así en la figura 5 se representa la desintegración del ${}_{86}^{\text{Rn}} 222$ (Esquema de desintegración) y su representación energética (espectro).

A otra desintegración similar dará lugar el polonio 210:

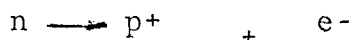


El alcance de las partículas α es poco penetrante. En la figura 6 se muestra el alcance medio en aire en función de la energía.

Desintegración β :

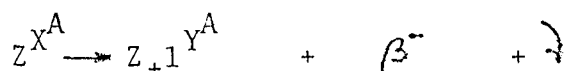
Cuando la relación N/Z es mayor que la unidad o inferior a ella el nucleído desintegra hacia uno de mayor estabilidad. En el caso de los radioisótopos naturales es más frecuente el exceso de neutrones, teniendo lugar la denominada emisión β negativa, que es la que se describe aquí.

En una transformación β^- el exceso de neutrones se elimina mediante la transformación de un neutrón en un protón y la emisión de un electrón, de acuerdo al siguiente esquema:



Se usa a lo largo de este curso tanto n como N para denominar a los neutrones y tanto Z como p para denominar a los protones.

Al reducirse en uno el número de neutrones y aumentar en uno el número de protones, el número atómico Z aumenta en una unidad es decir:



$\bar{\nu}$ denota una partícula sin carga y de masa despreciable denominada neutrino.

Así por ejemplo, el tritio ${}_1^3\text{H}$ es inestable debido al exceso de un neutrón. Este estado de "poca estabilidad" del hidrógeno sufre una transformación al desintegrar: uno de los neutrones se transforma en protón adquiriendo el nucleído hija la configuración del helio ${}_2^3\text{He}$ (isótopo estable).

En la figura 7 se representa esta transformación. La inclinación hacia la derecha de la transición indica que el número Z aumenta.

La energía de estas partículas β emitidas no es constante como sucedía para la radiación α , sino que aquí las energías representan un espectro continuo dentro de un cierto rango que caracteriza a un elemento. Así por ejemplo, en la Figura 8 se representa el espectro de energía para el tritio.

La energía máxima ($E_{\max}$) caracteriza a cada radionucleído emisor β . El valor más probable de energía para las partículas se produce aproximadamente en $E_{\max}$. La desintegración β es seguida en la mayoría de los casos de una emisión adicional de tipo electromagnético denominada γ que lleva finalmente al estado fundamental.

Las partículas β son poco penetrantes. La figura 9 muestra el alcance de las mismas en distintos medios en función de la energía máxima.

Para el tritio, uno de los radioisótopos existentes en las centrales de agua pesada, el alcance para distintos materiales se da en el cuadro de la figura 10.

En el cuadro de la figura 11 se indican algunos radionucleídos emisores β y sus energías asociadas.

Desintegración γ :

Se vió que con posterioridad a la emisión por parte del núcleo de una partícula α o β , éste aún podía poseer un cierto grado de excitación produciéndose una radiación electromagnética,

del mismo tipo que la luz y los rayos X. Esta radiación de origen nuclear se denomina radiación γ . La energía E de estas radiaciones es directamente proporcional a su frecuencia :

$$E = h \cdot \nu$$

La constante de proporcionalidad, se denomina "constante de Plank" y es igual a $6,54 \times 10^{-20}$ erg. seg. Como la frecuencia ν es a su vez igual a la velocidad de la luz sobre la longitud de onda λ de esta radiación:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}, \text{ se deduce que } E = h \cdot c / \lambda$$

Se observa que las radiaciones de más energía son aquellas que poseen longitudes de onda pequeñas como ya se ha dicho. Un elemento radioactivo luego de emitir una partícula α o una partícula β puede emitir una radiación γ . Contrariamente a lo que ocurriría con la desintegración β donde el espectro de energía era continuo, la radiación gamma, es monoenergética. Así, en las figuras 12 y 13 pueden verse los diagramas de energía para distintos radionucleídos (cobalto 60 y iodo 131).

En cuanto al alcance de la radiación γ , pueden reducirse los efectos de ésta (se puede atenuar), pero nunca disminuirlos a un valor nulo.

Si se toma como efecto, la ionización que esta radiación produce en el aire, puede estudiarse la influencia de distintos materiales atenuadores de la radiación.

En la figura 14 puede observar la relación de atenuación a radiaciones de Co^{60} $\frac{I}{I_0}$ para distintos espesores de hierro y plomo.

Para distintas energías la absorción de los materiales varía. De ahí que la energía del radionucleído y su intensidad de radiación E sean los parámetros mínimos necesarios para la elección de un blindaje.

3 LEYES DEL DECAIMIENTO RADIOACTIVO

Como se ha visto un elemento radioactivo, desintegra de modo α ó β , teniendo asociada en la generalidad de los casos radiación γ . Al desintegrar, debido a la transformación que sufre el núcleo, aparece un nuevo elemento que puede ser o no radioactivo. Si se mide el número de átomos del elemento original a lo largo del tiempo, se tiene que esta cantidad varía con la ley:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad 3-1$$

siendo N_0 el número de átomos del elemento original (o madre)

al comienzo de la medición ($t=0$). N es el número de átomos del nuevo elemento formado (o hija) al cabo del tiempo t . La constante λ (constante de desintegración) depende del elemento que desintegra siendo un valor característico de cada radionucleído. Los elementos con gran velocidad de desintegración poseen valores de λ grandes. Es decir a mayor velocidad de desintegración mayores valores de λ . Sus unidades son $\left[\frac{1}{t}\right]$.

Si se representa la expresión (3-1) para un determinado valor de λ , por ej. para el tritio $\lambda = 5,7 \times 10^{-2}$ 1/año (fig. 15), se ve que para tiempos grandes $t \rightarrow \infty$ queda muy poco del elemento original. A veces resulta más cómodo daren lugar de la constante de desintegración λ , el tiempo necesario para que el elemento original haya quedado reducido a la mitad en lo que respecta a su número de átomos. Ese tiempo $t = \bar{t}$ denominado período de semidesintegración puede calcularse a partir de la (3-1).

$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda \bar{t}} \quad \therefore 2 = e^{\lambda \bar{t}}$$

tomando logaritmos naturales:

$$\ln 2 = \lambda \bar{t} \quad \therefore \bar{t} = \ln 2 / \lambda$$

$$\bar{t} = \frac{0,692}{\lambda} \quad (3-2)$$

En lugar de referirse al número de átomos originales presentes, que no es accesible a la observación, es habitual considerar la actividad, que es lo que realmente se mide. La actividad (A), por definición es el número de átomos desintegrados en la unidad de tiempo

$$A = -\frac{\Delta N}{\Delta t} = N\lambda \quad \text{reemplazando en (3-1)}$$

$$A = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t} \quad (3-3)$$

4.1 Unidades de radioactividad

Como puede observarse, la actividad de un elemento representa el número de desintegraciones en la unidad de tiempo. Debido a que en la práctica, manejarse con el número de átomos representa operar con números muy grandes, se ha definido como unidad de actividad el curie (Ci) que representa $3,7 \times 10^{10}$ átomos desintegrados por segundo.

Los submúltiplos millicurie (mCi), milésima parte del Ci y microcurie (μ Ci) millonésima parte también son usados con frecuencia.

4.2 Concepto de flujo de radiación.

Las partículas o radiaciones emitidas en el proceso de desintegración, para el caso de una fuente puntual son emitidas con igual probabilidad hacia todas las direcciones del espacio, se dice entonces que la fuente es omnidireccional (figura 16).

Para estudiar los efectos de las radiaciones a una cierta distancia (R) de la fuente, es necesario determinar la cantidad de partículas por unidad de tiempo que alcanzan una determinada superficie ΔS .

Este valor se denomina flujo de radiación.

El flujo de radiación para una fuente puntual de A [desintegraciones/seg.], resulta de dividir estas por la superficie de la esfera de radio R, por lo tanto se tiene:

$$\phi = \frac{A}{4 \pi R^2} \left[\frac{\text{desintegraciones}}{\text{segundo cm}^2} \right] \quad (4-2-1)$$

Esto es válido si el medio no absorbe la radiación. En caso contrario vale la expresión:

$$\phi = \frac{A}{4 \pi R^2} K \quad (4-2-2)$$

donde K es una constante que depende del medio, de la distancia R y de la energía de la radiación.

Se suele también definir la densidad de flujo de energía. En este caso $I = \phi E$ (4-2-3) donde E es la energía de las partículas.

5. Interacción de la radiación con la materia

5.1 Partículas α

Las partículas α al incidir sobre la materia interactúan preferentemente con los electrones orbitales. Como consecuencia de este proceso pueden producirse diferentes fenómenos, tales

como disociación de las moléculas y excitación o ionización de átomos y moléculas. Debido a la forma de interacción con la materia, las partículas α pierden su energía en múltiples procesos, hasta alcanzar el reposo. El mínimo espesor de materia necesario para absorber totalmente una partícula α se denomina alcance. En este caso, el alcance es prácticamente igual al recorrido de la misma dentro del absorbente, ya que el camino seguido por la partícula α en la materia es prácticamente recto.

En la figura 6 se ilustra el alcance en aire de partículas α en función de la energía de las mismas.

El alcance en tejidos animales varía entre 30 a 40 μ .

5.2 Partículas β

Cuando las partículas β o en general los electrones atraviesan la materia, interactúan con los átomos y núcleos de los elementos constitutivos de ésta mediante procesos más complicados que los correspondientes a las partículas α . En su paso por la materia, los electrones sufren desviaciones en la dirección de su recorrido y además, pierden su energía cinética por ionización o por radiación. Se entiende por absorción los efectos combinados de este proceso. El mínimo espesor de absorbente necesario para frenar completamente a los electrones se denomina alcance máximo. A diferencia de lo que sucede con las partículas α , los electrones efectúan un recorrido mayor que el alcance máximo, (fig. 17).

5.3 Radiación γ

La radiación electromagnética puede interactuar con la materia en tres formas fundamentales, dependiendo de la energía del haz incidente. Estos procesos de interacción se denominan: Efecto Fotoeléctrico, efecto Compton y efecto de formación de pares.

Efecto Fotoeléctrico

Tiene lugar cuando el haz incidente de energía $E_0 = h\nu_0$ interacciona con el conjunto de los electrones de material receptor, transfiriendo la totalidad de la energía. Como consecuencia de este fenómeno es emitido por el material un electrón con una determinada energía E_1 en una dirección dada. Este fenómeno tiene lugar para energías del haz incidente de menos de 0,1 Mev. En la figura 18 se esquematiza este proceso.

Efecto Compton

Tiene lugar cuando el haz incidente de energía $E_0 = h\nu_0$ interacciona con un electrón atómico produciéndose una radiación electromagnética emergente de menor frecuencia que el haz incidente. Además emerge con un determinado ángulo φ

un electrón denominado "electrón Compton".
Si $h\nu$ es la energía del haz electromagnético emergente y E_1 la energía cinética del electrón Compton, se cumple que

$$h\nu_0 = h\nu + E_1$$

La figura 19 esquematiza el proceso.

Formación de pares:

Aquí el haz incidente interacciona con el núcleo del átomo de "material absorbente", emitiéndose un electrón positivo y un electrón negativo con una energía cinética total igual a la de la radiación incidente, menos $2m_0c^2 = 1,022 \text{ Mev}$, donde m_0 es la masa en reposo del electrón y C es la velocidad de la luz.

En un determinado momento, luego de emitido el par electrón positivo, electrón negativo, el primero alcanza el reposo aniquilándose con un electrón negativo libre del material. Como consecuencia de ello, desaparece la masa de ambos y se originan dos fotones de $0,511 \text{ Mev}$ cada uno, que son emitidos en la misma dirección y sentidos opuestos. En la figura 20 se esquematiza el fenómeno.

Como ya se ha dicho anteriormente, la radiación γ solo puede atenuarse, pero no eliminarse por completo. Si la radiación γ incide sobre una porción de materia de espesor $X \text{ [cm]}$, se verifica que emerge una radiación de menor amplitud de la misma energía, dada por la relación:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu_e \cdot X}$$

donde los significados de los símbolos (5-1) se aprecian en la figura 21.

Al valor μ_e se lo denomina coeficiente de atenuación lineal ($1/\text{cm}$) y es la combinación de los efectos fotoeléctricos, Compton y de formación de pares que tienen lugar en el material.

Así entonces puede escribirse que:

$$\mu_e = \mu_{ef} + \mu_{ec} + \mu_{ep} \quad (5-2)$$

μ_{ef} : coeficiente de atenuación lineal debido al efecto fotoeléctrico.

μ_{ec} : coeficiente de atenuación lineal debido al Efecto Compton.

μ_{ep} : coeficiente de atenuación lineal debido al efecto de formación de pares.

En la figura 22 se grafican los coeficientes totales de atenuación lineal para el aire y distintos materiales usados normalmente como blindajes.

En la expresión 5-1, la intensidad del haz de radiación electromagnética (radiación γ) puede expresarse en unidades de energía por unidad de superficie atravesada y por unidad de tiempo, es decir:

$$I \left[\frac{\text{Mev}}{\text{cm}^2 \cdot \text{seg.}} \right]$$

denominada a veces "densidad de flujo de energía radiante".

Exposición:

Una manera de medir físicamente los efectos de la radiación electromagnética, consiste en medir su poder de ionización. Para la radiación γ o radiación X se dice que existe una unidad de exposición cuando los efectos de la radiación producen en 1 cm³ de aire seco (1,293 mg.) una ionización de una unidad electrostática de carga de cada signo.

La unidad es el roentgen.

Para calcular en términos de energía de ionización por gramo de aire, el valor de 1 roentgen, recordemos que:

Energía necesaria para producir

1 par de iones : 32 a 33 eV

Carga de 1 ion: $4,8 \times 10^{-10}$ ues

1 ues (q) = $1/4,8 \times 10^{-10} = 2,08 \times 10^9$ pares de iones

1 ev = $1,6 \times 10^{-12}$ erg.

$$X=1r = \frac{1 \text{ ues (q)}}{1,29 \times 10^{-3} \text{ g}} =$$

$$= \frac{2,08 \times 10^9 \text{ p. iones}}{1,29 \times 10^{-3} \text{ g}} \times \frac{32 \text{ ev}}{\text{p. iones}} \times 1,6 \times 10^{-12} \frac{\text{erg}}{\text{ev}} =$$

$$= 1r = 84 \text{ erg/g} \quad (5-3)$$

El valor (energético) de la exposición puede ser medido por instrumentos apropiados en el punto del espacio deseado. Sin embargo puede también ser calculado conociendo:

A: actividad de la fuente [dpS]
 $\mathcal{E}$: energía de la radiación [Mev]
 d: Distancia entre la fuente y el punto donde se quiere calcular la exposición [cm]

La energía cedida por unidad de masa y por unidad de tiempo, que se medirá en $\left[\frac{\text{energía}}{\text{gramo} \times \text{tiempo}} \right]$ será

$$\dot{X} = \frac{X}{t} = \frac{I \cdot \mu_a}{\delta_a} \quad (5-4) \quad \mu_a = \text{coef. de absorción lineal para el aire.}$$

donde I es la densidad de flujo de energía

$\left(\frac{\mu}{\delta} \right)_a$ es el coeficiente de absorción másico para el aire (cm^2/g)

δ_a = densidad del aire $[\text{g}/\text{cm}^3]$

Reemplazando, se tiene:

$$\dot{X} = \frac{A \mathcal{E}}{4 \pi d^2} \left(\frac{\mu}{\delta} \right)_a \cdot 1.6 \times 10^{-6} \frac{\text{erg}}{\text{g} \cdot \text{seg}} \cdot K \quad \left[\frac{\text{erg}}{\text{g} \cdot \text{seg}} \right] \quad (5-5)$$

K: vale aproximadamente 1 para el aire

El valor $\left(\frac{\mu}{\delta} \right)_a$ se encuentra graficado en la figura 22'

Si $\dot{X}$ se quiere expresar en r/h, la 5-5 será:

$$\dot{X} [r/h] = 20 \times 10^4 \times \frac{\mathcal{E} [\text{Mev}] \cdot \left(\frac{\mu}{\delta} \right)_a \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \right] \times A [\text{Ci}]}{d^2 [\text{cm}^2]} \quad (5-6)$$

Si el elemento radioactivo decae en distinto niveles con energías E_1, E_2, E_n y la probabilidad de desintegración es p_1, p_2, p_n

$$\dot{X} [r/h] = 20 \times 10^4 \times \frac{A}{d^2} \sum E_i p_i \left(\frac{\mu}{\delta} \right)_a \quad (5-7)$$

Dosis

Se denomina dosis absorbida (D) de cualquier radiación, a la energía absorbida en la materia por unidad de masa de la misma en el punto de interés.

En este caso el concepto de energía absorbida es más general pues este fenómeno puede tener lugar en cualquier material y ser debido a cualquier tipo de radiación.

Se cumplirá entonces que

$$D = \frac{\text{Energía absorbida}}{\text{unidad de masa}} \left[\frac{\text{erg}}{\text{g}} \right] \quad (5-8)$$

La unidad de dosis es el rad

$$\text{siendo } 1 \text{ rad} = \frac{100 \text{ erg}}{\text{g}}$$

La dosis en la unidad de tiempo o "rate de dosis" será:

$$\dot{D} = \frac{\text{Energía absorbida}}{\text{unidad de masa} \times \text{unidad de tiempo}} \left[\frac{\text{erg}}{\text{g} \times \text{seg}} \right]$$

$$\dot{D} = \frac{I \cdot \mu}{S} \quad (5-9)$$

$$\dot{D} = \frac{A \cdot \sum}{4 \pi d^2} \cdot \frac{\mu}{S} \cdot K \quad (5-10)$$

donde

A, $\sum$ y d tienen el significado de la expresión 5-5.
 μ = coeficiente de absorción lineal para el material donde se calcula la dosis.
 $S \text{ [g/cm}^3\text{]}$: densidad del material donde se calcula la dosis.

$K = e^{-\mu_x}$ es la atenuación que sufre la radiación en el material interpuesto (blindaje) cuyo coeficiente de atenuación lineal es μ_x y cuyo espesor es x

reemplazando en la 5-10 se tiene:

$$D \left[\text{rad/h} \right] = 17 \times 10^4 \frac{A}{d^2} \sum E_i p_i \left(\frac{\mu}{S} \right)_i e^{-\mu_i X} \quad (5-11)$$

En la figura 23 se esquematiza la fuente (puntual) y la materia donde sus radiaciones producen un rate de dosis $\dot{D}$.

Eficiencia relativa:

Desde el punto de vista biológico se ha comprobado que radiaciones ionizantes de distintos tipos, producen efectos distintos. En estos casos la indicación de la dosis no resulta suficiente, dado que 1 rad de radiación γ no producirá los mismos efectos que 1 rad de neutrones térmicos. Se define entonces la "eficiencia relativa" (ER) que tiene en cuenta el fenómeno comentado. La eficiencia relativa se define como la relación de la dosis requerida por una radiación patrón (X, γ) para producir un determinado efecto biológico y la dosis de la radiación en consideración para producir el mismo efecto.

$$ER = \frac{\text{Dosis radiación patrón}}{\text{Dosis radiación en consideración}} \quad \left| \begin{array}{l} \text{El mismo} \\ \text{efecto} \end{array} \right.$$

Para tener en cuenta el fenómeno comentado, se define una nueva unidad, el "rem" (roentgen equivalent man) que se define como aquella dosis de cualquier radiación ionizante, la cual aplicada en el hombre (o mamíferos), es biológicamente equivalente a la dosis de 1 rad de radiación X ó γ .-

$$\text{Dosis en rem} = \text{Dosis en rad} \times ER$$

A los fines prácticos pueden adoptarse los siguientes valores de ER

	ER
Radiación X, γ y β	1
Neutrones térmicos	2,5
Neutrones rápidos	10
Protones	10
Radiación α natural	10

En otras palabras, se dice que en un punto se recibe una dosis de 1 rem cuando se obtiene el mismo efecto que se obtendría con un rad de radiación γ .

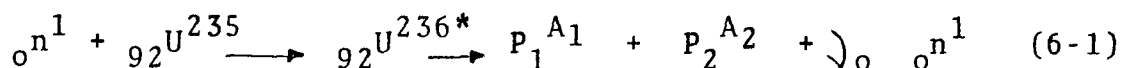
6 - Fisión

Se denomina fisión al fenómeno de escisión de un núcleo. Esta escisión del núcleo puede producirse en forma espontánea (fisión espontánea) o por acción externa (bombardeo neutrónico, protónico, partículas α etc.).

Desde el punto de vista radiológico, en la operación de reactores nucleares importa la fisión de núcleos pesados por acción de los neutrones.

El uranio natural, material de los elementos combustibles del reactor de Atucha contiene 0,71% de U^{235} .

Este último elemento interacciona con neutrones de una determinada energía, denominados térmicos, produciéndose la fisión. Es decir, el núcleo original de U^{235} se escisiona en dos núcleos más livianos de acuerdo a la siguiente ecuación:



donde:

${}_0n^1$: neutrón térmico incidente

$p_1^{A_1}$: elemento "liviano" de número másico A_1 (producto de fisión).

$p_2^{A_2}$: elemento "liviano" de número másico A_2 (producto de fisión).

γ_0 : número entero

$\gamma_0 {}_0n^1$: número de neutrones emitidos en la fisión.

*

 : indica estado meta-estable

De una fisión a otra, los productos $p_1^{A_1}$ y $p_2^{A_2}$ varían estadísticamente, pero se cumple que $A_1 + A_2 + \gamma_0 = 235 + 1$

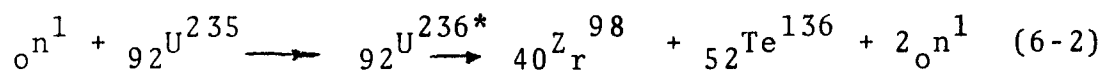
En cuanto al número de neutrones emitidos, si se analiza que sucede, por ejemplo a lo largo de 1000 fisiones se encuentra una distribución como la de la siguiente tabla:

Número de neutrones de
fisión emitidos ν_0

Número de veces que aparece
ese número en 1000 fisiones

0	27
1	158
2	339
3	302
4	130
5	34

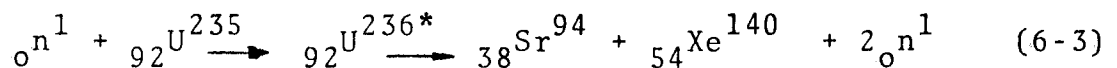
Una fisión de acuerdo a la ecuación anterior podría ser:



$$98 + 136 + 2 = 236$$

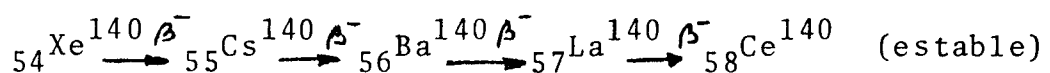
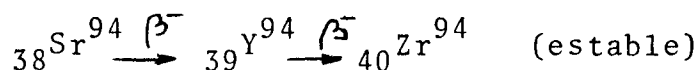
$$40 + 52 = 92$$

Otro ejemplo sería:



Ahora bien, los productos de fisión conservan la relación neutrones/protones en un valor alto, lo que determina que sean inestables.

En general estos productos de fisión alcanzan la estabilidad en 2 ó 3 desintegraciones β^- , acompañadas por desintegración γ . Así para la última ecuación se tiene que el ${}_{38}Sr^{94}$ sigue la evolución:



Se concluye entonces que los productos de fisión son radio-activos, constituyendo muchos de ellos peligros radiológicos si no se toman medidas de precaución.

Debido a esta razón, los lugares de los circuitos o instalaciones de la Central que puedan alojar productos de fisión poseen en mayor o menor medida blindajes.

Muchos de los productos de fisión aparecen en estado gaseoso y si los mismos quedan liberados a la atmósfera pueden ser inhalados.

Estos casos se encuentran considerados en el diseño del sistema de ventilación de la Central.

Los productos de fisión más importantes, desde el punto de vista radiológico se encuentran indicados en la tabla siguiente.

PRODUCTOS DE FISION EN LA CENTRAL NUCLEAR ATUCHA

GASES NOBLES

	<u>semiperíodo</u>	<u>emisión principal</u>
Kr 85 m	4,4 h	β^- , γ
Kr 85	10,3 a	β^-
Kr 87	1,3 h	β^- , γ
Kr 88	2,8 h	β^- , γ
Xe 133	126 h	β^-
Xe 135	9,1 h	β^- , γ

HALOGENOS

Br 84	0,5 h	β^- , γ
I 131	8,1 d	β^- , γ
I 132	2,3 h	β^- , γ
I 133	20,8 h	β^- , γ
I 134	0,9 h	β^- , γ
I 135	6,7 h	β^- , γ

.../// 20 -

VARIOS

	<u>semiperíodo</u>	<u>emisión principal</u>
Cs 137	30 a	β^- , γ
Cs 138	0,5 h	β^- , γ
Sr 89	50,5 d	β^-
Sr 90	27,7 a	β^-
Y 90	2,7 d	β^-
Zr 95	65 d	β^- , γ
Ru 103	39,8 d	β^- , γ
Ce 141	33,1 d	β^- , γ
Pm 147	2,6 a	β^-

...///

7. Efectos de las radiaciones

El efecto de la interacción de cualquier tipo de radiaciones con el tejido acuoso es producir daños, muerte o modificaciones varias, a nivel celular. Este fenómeno, considerado del punto de vista del organismo entero, lleva a producir tres clases diferentes de efectos:

- Inmediatos
- Mediatos (o somáticos)
- Genéticos

7.1 Efectos inmediatos

Los efectos inmediatos se producen para dosis superiores a 25 rem recibidas por todo el organismo en un corto intervalo de tiempo.

Para valores superiores se producen las siguientes alteraciones:

25 a 50 rem :	eventual alteración de la sangre, no hay lesiones aparentes.
50 a 100 rem :	alteración de glóbulos en sangre, algunas lesiones, no hay enfermedad.
100 a 200 rem :	lesiones, eventual enfermedad.
200 a 400 rem :	lesiones y enfermedad segura.
400 rem :	muerte en el 50% de los casos.
600 rem o más :	muerte segura.

Todos los datos consignados son para irradiación total del organismo. Es oportuno consignar que la máxima dosis permisible anual es de 5 rem.

7.2 Efectos somáticos

Son aquellos que se pueden producir mucho tiempo después de la irradiación. Los mismos ocurrirán en el caso de irradiaciones agudas o de irradiaciones distribuidas a lo largo del tiempo. Es de hacer notar que los efectos de las radiaciones son acumulativos.

Los principales efectos somáticos son:

Inducción de leucemia:

La probabilidad de contraer leucemia por irradiación es de $1 \text{ a } 2 \cdot 10^{-6}$ / rad.año . Es decir que si un millón de personas se irradian durante un año con 1 rad por persona, una o dos de ellas contraerán leucemia como causa directa de la irradiación.

Cáncer de huesos:

Al ingerir calcio, radio y radioelementos de esa familia, se produce una lenta deposición de ellos en hueso. La consiguiente irradiación lleva a que se incremente la probabilidad natural de contraer cáncer de huesos.

Cáncer de pulmón:

La deposición de partículas radioactivas, (0,1 a 14) en los pulmones aumenta la probabilidad de ocurrencia de esta enfermedad. Las partículas especialmente nocivas son las formadas por sólidos insolubles.

Cáncer de tiroides:

Se puede generar por ingestión de radioiodo. El correcto uso de las máscaras respiratorias impide la entrada al organismo de aerosoles e iodo.

Cataratas:

La irradiación del cristalino del ojo con rayos β ó γ puede inducir la formación de cataratas. El caso es factible de ocurrir en trabajos sobre piezas muy contaminadas superficialmente.

Acortamiento de vida:

Para dosis altas, del orden de 100 rad, se ha comprobado que existe un acortamiento de vida del individuo (del orden de los días). Para irradiaciones menores no hay datos concretos.

7.3 Efectos genéticos:

En la especie humana las características del individuo son transmitidas de una a otra generación por medio de los cromosomas localizados en el núcleo de las células reproductoras. Los genes del padre y de la madre se unen para dar las características del nuevo individuo. Las modificaciones que producen las radiaciones ionizantes en los genes (mutaciones) son del tipo recesivas, es decir que para que la mutación se transmita hace falta que los genes de padre y madre hayan sufrido la misma mutación. Es por ello que una relativamente baja dosis repartida entre una gran cantidad de

individuos puede producir mayores efectos genéticos que una alta dosis repartida entre pocos individuos. De acuerdo a los estudios efectuados la generación de defectos hereditarios aumenta proporcionalmente con la dosis.

Una dosis promedio de 30 rad, sobre toda la vida de cada uno de los componentes de una generación, lleva a duplicar el valor original de ocurrencia de defectos hereditarios.

8. Radiación externa y contaminación

Es de fundamental importancia tener muy en claro las dos formas en que un elemento radiactivo puede alcanzar y producir daño a un organismo. Ellas son (fig. 23):

- Por radiación directa desde una fuente externa al organismo; los responsables son los neutrones, rayos γ y en menor proporción los β .
- Por emisión de rayos β ó α desde sustancias incorporadas al organismo (dentro de él o sobre la piel).

La primer forma se denomina comunmente radiación externa y la segunda contaminación interna.

Los neutrones, en la CNA, existen solamente en el reactor y su recinto durante la operación; estando el acceso al local del reactor vedado durante su funcionamiento, no nos ocuparemos en el presente capítulo de la radiación neutrónica.

Dadas las características de los rayos α , β y γ una vez que el organismo salió del alcance de la radiación no se producirá más daño que el generado hasta ese momento.

En la mayoría de los casos de irradiación externa resulta muy sencillo alejarse de la fuente de radiación, mientras que en los casos de contaminación interna es muy difícil eliminar los radioelementos incorporados al organismo.

De acuerdo a (5-11) la dosis por unidad de tiempo, debida a radiación recibida desde una fuente externa, es proporcional al flujo de radiación incidente (ϕ), a la energía de cada una de las partículas (ϵ), y a un factor de blindaje (k).

$$\dot{D} \cong D/t \simeq \phi \cdot \epsilon \cdot k \quad (8-1)$$

El flujo es a su vez proporcional a la actividad de la fuente (A) e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (d) que separa el individuo de la fuente emisora de radiación

$$D \approx \frac{A}{d^2} \cdot \epsilon \cdot t \cdot k \quad (8-2)$$

En el caso de contaminación del organismo la dosis recibida es proporcional a la cantidad de sustancia incorporada (Q), a la energía de la radiación emitida (ϵ) y al semi-período efectivo de eliminación y decaimiento de la sustancia ($T_{1/2}$).

$$D \approx Q \cdot \epsilon \cdot T_{1/2}$$

Comparando ambas expresiones se ve que el tiempo de exposición t , en el caso de fuente externa, puede ser limitado voluntariamente; en el caso de incorporación interna el tiempo de exposición está dado por factores inherentes al radio elemento y su metabolismo.

9. Elementos de protección

9.1 Elementos de protección contra la radiación externa

Distancia

De acuerdo a lo visto anteriormente la dosis recibida es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.

$$D \approx \frac{A}{d^2} \cdot \epsilon \cdot t \cdot k \quad (9-1-1)$$

De los factores de protección contra la radiación externa el de distancia es el de mayor incidencia.

Tiempo

La misma expresión anterior indica que duplicando el tiempo de exposición se duplica la dosis recibida. Para disminuir al máximo esta magnitud es necesario que todas las intervenciones y trabajos a efectuarse sobre materiales radiactivos sean programados con el mayor cuidado posible.

Blindaje

Interponiendo entre la fuente emisora y el individuo que se desea proteger un blindaje adecuado, se reduce la dosis recibida en un factor (k); el mismo se puede expresar como

$e^{-\mu x}$ siendo μ un parámetro que varía de acuerdo a la energía de la radiación y al material blindante y x el espesor del material interpuesto. (ver capítulo 5).

Los materiales más utilizados como blindajes son el plomo, hormigón y agua.

Como dato ilustrativo se dan los espesores de algunos materiales que reducen a la mitad la dosis inicial producida por

fuentes puntuales compuestas por los radioelementos más comunes en la CNA (se toma como energía promedio de desintegración γ 0,7 Mev).

Agua:	8,3 cm
Hormigón:	4,0 cm
Hierro:	1,3 cm
Plomo:	0,7 cm

9.2 Elementos de protección contra la contaminación

Guantes

De acuerdo al tipo de trabajo que se efectúe serán de algodón (trabajos en seco) o impermeables (polietileno o goma). Los guantes de algodón poseen la innegable ventaja de permitir "respirar" la mano y al mismo tiempo no permiten la dispersión del contaminante "no fijo", vale decir, la contaminación depositada sobre superficies se adhiere a la tela del guante no extendiéndose a otros sitios. Teniendo la precaución de cambiarse los guantes a menudo no existe ningún riesgo de contaminación de la mano.

Resumiendo:

Guantes de tela: contaminaciones menores y secas

Guantes de polietileno: contaminaciones probablemente húmedas.

Guantes de goma: contaminaciones mayores o húmedas.

Para que la protección que otorgan los guantes sea realmente efectiva es muy importante la forma de quitárselos. Durante esta operación es imprescindible no tocar en ningún momento la parte externa de los guantes con las manos desnudas.

Cubrezapatos

Su misión primaria es evitar la dispersión de la contaminación; es decir, evitar que desde un área, eventualmente más contaminada que las circundantes, se disperse material radiactivo a través de los zapatos.

Otra finalidad de los cubrezapatos es evitar contaminaciones del calzado ya que el mismo se lava o se desecha con mucha mayor facilidad que el calzado.

En las entradas y salidas de áreas donde sea necesario utilizar cubrezapatos se colocarán las llamadas "barreras de zapatos"; éstas consisten sencillamente en un banco atravesado al paso del personal donde deben colocarse los cubrezapatos.

A los efectos de que la barrera de zapatos cumpla con su cometido es importante no pisar con cubrezapatos el área limpia o con los zapatos la contaminada.

Capucha del traje de trabajo:

La misma tiene por objeto proteger al individuo contra contaminaciones del cabello y cuero cabelludo. Será usada:

- siempre que se trabaje en una zona contaminada.
- antes de colocarse un equipo protector respiratorio.
- antes de colocarse un casco.
- antes de colocarse antiparras protectoras de los ojos.

Máscaras faciales:

Su misión es proteger contra la inhalación de aerosoles, iodo y en ciertos casos otorga una protección parcial contra tritio. Es de hacer notar que para reterner tritio es necesario acoplar la máscara a un sistema de suministro de aire respirable; ningún tipo de filtro retiene el tritio. La entrada de tritio por piel se anula solo por el uso de vestimenta especial.

Existen dos tipos de máscaras: semi-máscara y máscara completa; la primera protege únicamente de la ingestión y/o inhalación, la máscara completa protege además contra eventuales contaminaciones del rostro e irradiación β de los ojos.

Las máscaras pueden acoplarse a filtros, equipos respiratorios autónomos o bien a la red de suministro de aire respirable.

Es importante tratar de mantener la máscara lo más limpia posible; por ello no es adecuado el ajustarse o sacarse la máscara con guantes que han estado en contacto directo con materiales contaminados.

Vestimenta especial:

Además de la vestimenta normal en zona controlada, que se comentará más adelante, pueden existir trajes suplementarios de protección; los mismos son de plástico y pueden tener circulación forzada de aire.

Para sacarse cualquier tipo de vestimenta especial se requiere en general el auxilio de una segunda persona para evitar contaminaciones personales o dispersión de los radioelementos.

10. Fuentes de irradiación externa y contaminación dentro de la CNA.

10.1 Fuentes de irradiación externa

Las dos principales son el reactor y los elementos combustibles que se retiran de él. En ambos casos existe siempre radiación γ , agregándose los neutrones que escapan del reactor cuando el mismo se halla crítico.

Además de ello se convierten en importantes fuentes de irradiación externa (✓) todos aquellos puntos en los cuales se forman depósitos de contaminaciones: resinas de intercambio para limpieza del sist. primario, diversos filtros mecánicos, concentrado de residuos líquidos, recipientes de almacenamiento de residuos, máquina de carga, botella basculante, etc.

10.2 Fuentes de contaminación

Los orígenes de todas las contaminaciones que se encuentran dentro de la CNA son:

- El reactor y sistema primario.
- Elementos combustibles depositados en pileta.
- Tratamiento de residuos radiactivos.

Reactor y sistema primario: (Fig. 24).

Dentro de él se generan en forma directa los productos de fisión; los mismos pueden escapar por fisuras, o en algunos casos por difusión, a través de las vainas de los elementos combustibles y así llegan al medio refrigerante. También genera productos de fisión el uranio que queda como impureza en el exterior de las vainas.

Los productos de corrosión se generan por interacción del flujo neutrónico sobre el agua pesada y elementos estructurales.

Es decir que finalmente el medio refrigerante y moderador que circula por el sistema primario y auxiliares es portador de radioelementos (productos de fisión y de corrosión). Estos radioelementos pueden difundir a través de cañerías o escapar por pérdidas localizadas de D_2O llegando a la atmósfera o a pisos y paredes.

Los productos de fisión y corrosión se depositan también en todas las superficies internas del sistema y, al efectuarse una posterior reparación, pueden pasar directamente al hombre o generar aerosoles (partículas submicrónicas) que pasan a la atmósfera circundante.

Los pisos, paredes y superficies externas de cañerías, válvulas, bombas, etc. pueden ser contaminadas por fugas directas del agua pesada o por deposición de los aerosoles suspendidos en la atmósfera.

Finalmente el hombre puede llegar a incorporar los radioelementos por contacto directo con superficies contaminadas (elementos del primario en reparaciones, pisos, paredes, etc.) o por inhalación directa de aerosoles, gases y/o vapores.

Elementos combustibles

Al llegar a piletas se desprenden productos de corrosión y fisión, adheridos en la superficie externa de las vainas durante la permanencia de los elementos combustibles dentro del reactor.

Estos productos se dispersan en el agua de piletas y pueden llegar al hombre por caminos similares a los mencionados en caso anterior.

Tratamiento de residuos radiactivos (Fig. 25)

Los residuos radiactivos líquidos se concentran y solidifican llevando así la fuente de contaminación a un recipiente hermético.

Los residuos sólidos se prensan y llevan al mismo tipo de recipiente o en algunos casos (residuos metálicos) se almacenan como tal.

Los residuos gaseosos se filtran y en algunos casos se dejan decaer antes de eliminarlos por chimenea.

En todos estos procesos puede haber escapes que originen contaminaciones localizadas; asimismo todos los componentes de los sistemas de tratamiento quedan internamente muy contaminados y posteriores reparaciones pueden hacer llegar los radioelementos al hombre.

11. Formas en que el organismo puede llegar a incorporar diversos radioelementos.

11.1 Tritio

El tritio se genera fundamentalmente por activación del deuterio constituyente del agua pesada.

Su comportamiento sigue las mismas leyes que el hidrógeno (H_2); se lo puede encontrar en forma molecular (gas) o combinado con oxígeno (O_2) formando agua tritiada (en fase líquida o vapor).



Se introduce al organismo con extrema facilidad, pudiéndolo hacer por boca, nariz o difundiendo a través de la piel. La difusión por piel se produce aún en superficies protegidas por ropas, ya que las telas comunes son fácilmente atravesadas por el tritio.

Este radioelemento se fija uniformemente en todo el organismo humano, salvo hueso, y se elimina con un semiperíodo de 10 a 12 días; vale decir, al cabo de ese intervalo se tiene la mitad de tritio de lo que originalmente había.

El control de la incorporación de tritio se lleva por medio de análisis periódicos de orina.

11.2 Iodo

Es un producto de fisión que puede escapar a través de las vainas de los elementos combustibles. Si este radioelemento llega a la atmósfera lo hace en forma gaseosa y puede ser incorporado al organismo a través de las vías respiratorias.

Dentro del organismo se fija preferentemente en tiroides eliminándose con un semiperíodo de 7 a 8 días.

Xe¹³³ y otros gases nobles

Por sus características no son asimilables por el organismo.

Su riesgo proviene no de su ingestión sino de la radiación por ellos emitida; forman una nube emisora y/o, que puede rodear al individuo y producir daños por radiación externa.

11.3 Productos sólidos de activación y fisión

La forma más común de encontrarlos es depositados sobre diversas superficies o en forma de aerosoles dispersos en la atmósfera.

En todos los casos de contaminaciones superficiales los radioelementos pueden llegar a ingresar al organismo por deposición de la contaminación sobre la piel del individuo y su posterior ingestión.

En el caso de aerosoles dispersos en la atmósfera la vía de entrada al organismo es el sistema respiratorio.

Los productos de fisión y corrosión se localizan en distintas partes del organismo siendo su semiperíodo distinto para cada uno de ellos.

12. Disposiciones para el acceso, circulación, y salida de zona controlada

Acceso y salida: Únicamente tendrá lugar a través de la puerta A ubicada en el Edificio Auxiliar en cota +12 m. Sólo en casos especiales, y con la autorización del Oficial de Protección radiológica, podrá utilizarse la puerta B.

Requisitos para el acceso: solamente tendrá acceso a la zona controlada el personal expresamente autorizado, cuya nómina obrará en el puesto de control 408 (Portería), debiendo ingresar con la vestimenta establecida.

Recibirá además dos dosímetros personales: un dosímetro tipo lapicera (control interno) y un dosímetro tipo film (control oficial) (figura 27).

Requisitos para la salida: para hacer abandono de la zona controlada todo el personal deberá medirse en el monitor 425 C, no debiendo presentar niveles de contaminación superiores a los establecidos por las autoridades de seguridad. Estos valores son ajustados de manera tal que el monitor emitirá una alarma óptico-acústica en caso que sean sobrepasados. En tales circunstancias, el Oficial de Radioprotección impedirá la salida del personal contaminado y hará que éste siga con las normas descritas para estos casos.

Movimiento de personas: para ingresar a zona controlada, previamente el personal deberá entrar al "vestuario frío" 401 dejando allí sus ropas de calle o ropa de "zona fría" y colocarse la ropa interior específica para zona controlada (camiseta, calzoncillo y medias). Encima de la ropa interior vestirá un guardapolvo de color blanco y cambiará su calzado por chinelas de goma.

Los efectos personales y la ropa quedan en gavetas individuales con cerradura.

Acto seguido, el personal traspone la puerta A y en la "barrera" E efectúa el cambio de calzado: deja en un casillero las chinelas de goma y retira de otro contiguo el calzado para "zona caliente" (zapatos o zapatillas de color amarillo).

En la portería, 408, retira sus dosímetros personales. Realizada esta operación se dirige siguiendo la trayectoria 1, a los "vestuarios calientes" 424 donde dejará el guardapolvo blanco en un perchero y retirará de otro el mameluco amarillo de "zona controlada".

Con esta indumentaria y con los dosímetros el personal está en condiciones de cumplir con las tareas asignadas respetando cualquier otro cambio de ropas que indiquen las autoridades radiosanitarias.

Para hacer abandono de la zona controlada y antes de ingresar al "vestuario caliente" 424, el personal debe controlarse por si mismo en el monitor 425 a para verificar si está o no contaminado. Pueden ocurrir los siguientes casos:

- a) No se registra alarma en 425 a: dado que no existe contaminación por encima de los valores permisibles el personal se dirige al "vestuario caliente" 424 donde deja el mameluco amarillo y viste el guardapolvo blanco. Siguiendo la trayectoria 2, atraviesa el recinto 410 donde se recomienda un lavado de manos, efectuando el monitoreo oficial en 425 c. De no mediar alarma, entrega los dosímetros en 408 y efectúa el cambio de los zapatos o zapatillas amarillas por las chi-

nelas que dejó al entrar en la barrera E. Continúa su camino saliendo por A e ingresando a los "vestuarios fríos" 401. La ropa interior específica de zona controlada y las chinelas las guarda en su gaveta personal y el guardapolvo blanco queda en los percheros destinados para tal fin.

- b) Se registra alarma en 425 a: de ocurrir ello, el personal deberá por sí mismo o preferentemente con ayuda del Oficial de radioprotección, determinar si la contaminación es debida al calzado, ropa o al cuerpo; adaptándose las medidas necesarias para evitar una mayor contaminación y su propagación a otros sectores.

Contaminación del calzado: el personal se quitará de inmediato el calzado y lo colocará dentro de una bolsa plástica que depositará en recipientes dispuestos en las inmediaciones del monitor 425 a. Luego se calzará unas bolsas de plástico y se dirigirá al recinto 424 donde cambiará el mameluco amarillo por el guardapolvo blanco. Siguiendo la trayectoria 2 y cumpliendo los requisitos restantes enunciados en a puede hacer abandono de la zona controlada.

Contaminación de la ropa: en este caso el personal se quitará de inmediato el mameluco de color amarillo introduciéndolo en una bolsa plástica y depositándolo en recipientes dispuestos a tales efectos en las inmediaciones de 425 a. Procederá a monitorarse nuevamente para determinar si la ropa interior se encuentra contaminada. Si no lo está, viste el guardapolvo blanco y prosigue la trayectoria 2 como en el caso anterior.

Si la ropa interior estuviera contaminada, seguirá la trayectoria 2, se quitará la ropa interior en el recinto 410 depositándola en los recipientes para ello destinados y procederá a ducharse. Se secará con toallas de papel y calzando botas plásticas y vistiendo guardapolvo blanco, que se hallan dispuestos en el local para estos casos, se medirá en el monitor 425 b. De no mediar alarma prosigue hacia 425 c. En caso contrario, vuelve a 410. (Como los zapatos o zapatillas amarillos no se encuentran contaminados, se dejarán en el casillero respectivo próximo a la barrera E, tomando allí las chinelas de goma).

Contaminación del cuerpo: luego de su determinación en el monitor 425 a, el contaminado requerirá el asesoramiento del Oficial de radioprotección y procederá

a su decontaminación (duchado, lavado parcial etc.) en el recinto 410. Luego de decontaminado se mide en el monitor 425 b. De no mediar alarma lo hace nuevamente en 425 c y, si aquí no hay inconvenientes, continúa de acuerdo a lo expresado en a. En este caso como en los anteriores si existe alarma en el monitor 425 c, el personal debe volver sobre sus pasos al recinto 410 para continuar con su decontaminación adoptando las medidas que sugiera el Oficial de radioprotección de guardia.

El personal que por contaminación retire guardapolvos del recinto 410, luego de su uso deberá entregarlo en la Portería 408, solicitando la reposición de la vestimenta de zona caliente "perdida" debido a su contaminación (mamelucos, zapatos, ropa interior etc.).

13. Máximos permisibles. Normas y disposiciones vigentes

La CNA se regirá por las Normas Básicas de Seguridad Radiológica y Nuclear de CNEA (publicación S.I. N°11).

La dosis máxima permisible para el personal es de 5 rem por año, con un máximo trimestral de 3 rem.

El control de la dosis γ externa se efectuará, como mínimo, con dos dosímetros: film monitor de lectura mensual y dosímetro lapicera de lectura directa. El control de la dosis recibida por incorporación de tritio se efectuará por análisis de orina.

Los restantes productos de corrosión y fisión se controlarán por mediciones directas de las radiaciones por ellos emitidas.

No se podrán efectuar operaciones planificadas cuando se estime que la dosis a recibir superará los 10 rem.

No se permitirá el trabajo en zona controlada a:

- menores de 18 años
- mujeres embarazadas
- personal que haya superado las dosis máximas permisibles
- personal que posea heridas abiertas o en proceso de cicatrización

El ingreso a locales usando equipos de respiración autónomo o trajes de protección total deberá efectuarse, como mínimo, de a dos personas. En su defecto deberá existir una permanente comunicación visual u óptica entre la persona que in-

gresa y otra que queda preparada a intervenir en caso de emergencia. Esta segunda persona tendrá a su alcance los mismos elementos de protección que quién ingresó.

No será permitido el ingreso, circulación o egreso de zona controlada con indumentaria no prescripta o autorizada por el Oficial de Radioprotección.

Dentro de la zona controlada no se podrá fumar ni ingerir comestibles o bebidas de ninguna especie. Queda exceptuado de esta regla tomar agua en los bebederos instalados a tal efecto.

No se permitirá el acceso a zonas que impliquen el uso de protecciones respiratorias, al personal que posea barba o bigotes de características tales que impidan un correcto ajuste de la máscara respiratoria.

Todo objeto material que salga de zona controlada deberá poseer una "autorización de salida"; la misma será otorgada previo control de contaminación superficial. Cuando no pueda extenderse dicha autorización por presentar valores por encima de los permisibles, el objeto quedará en la zona controlada a los efectos de ser decontaminado; en caso de no poder lograrse esto último será tratado como un desecho radioactivo.

14. Alarmas y planes de evacuación

Las alarmas acústicas están mencionadas en la figura 26.

a) Alarma general

Significa evacuación rápida de todos los edificios (reactor, piletas, auxiliares, maniobras, máquinas, instalaciones secundarias, casa de bombas y turbina hidráulica) y espacios libres circundantes; el personal se dirigirá, por los caminos marcados por flechas pintadas en el piso, hacia la caja de escalera este del edificio de maniobras, nivel 0 mts. (frente al transformador de arranque).

Personal que provenga de zona controlada (vestimenta amarilla) permanecerá separado del resto en el lugar demarcado por el Oficial de radioprotección. Luego se seguirán las indicaciones que él impartirá.

- . Personal que se encuentra en las barracas de CNEA, Siemens, Sideco, taller automotores, enfermería, prefectura, pabellones de Siemens se reunirá en la Cantina. Desde allí se comunicará telefónicamente con la Sala de Mando y seguirá las instrucciones que se impartan.
- . Personal que se encuentra en portería nueva y Sala de exposición permanecen en ese lugar y se comunican telefónicamente con la Sala de Mando solicitando instrucciones.

b) Alarma de fuga

Significa evacuación rápida de uno o todos los edificios de zona controlada siguiendo las flechas de fugas.

Personal que se encuentra en el edificio del reactor hace abandono del mismo por las compuertas de 12 mts. o la salida de emergencia de 0 mts. Si lo hiciera por esta última permanece en el espacio comprendido entre las esferas de acero y de hormigón esperando la llegada del Oficial de Radioprotección.

El personal que abandona el edificio de auxiliares, piletas y/o anular sigue las flechas de fuga y una vez fuera de zona controlada se dirige al punto de reunión (edificio de maniobras, caja de escalera, 0 mts. frente al transformador de arranque).

c) Alarma de evacuación

Significa evacuación, por las salidas normales, de uno o varios edificios de zona controlada.

El personal involucrado se dirigirá, sin seguir las flechas de fugas, hacia las salidas normales del edificio en cuestión:

evacuación del ed. del reactor: salida por compuerta 12 mts.

evacuación del recinto anular: salida por compuerta -6,50 mts. (hacia edificio de auxiliares)

evacuación de casa de piletas: salida por -6,50 mts. hacia edificio de auxiliares.

evacuación del edificio de auxiliares: (implica evacuación del edificio del reactor) salida del personal por 12 mts. hacia el edificio de maniobras.

d) Alarma de incendio

Significa fuego en el lugar especificado en el mensaje que se transmite junto a la alarma.

Las personas que no pertenezcan a las brigadas de incendio harán abandono del local o edificio, salvo que se lo indicase expresamente.

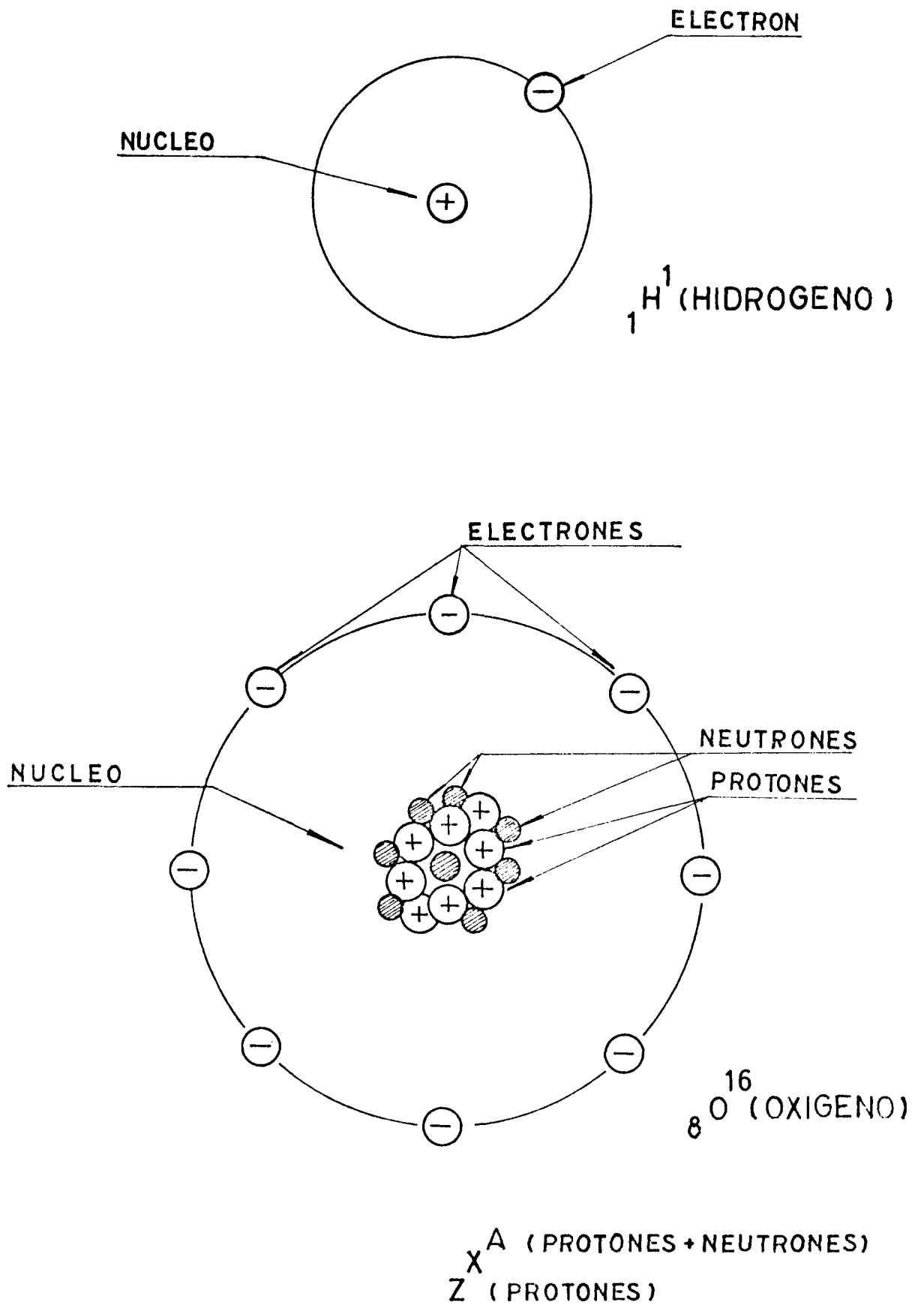
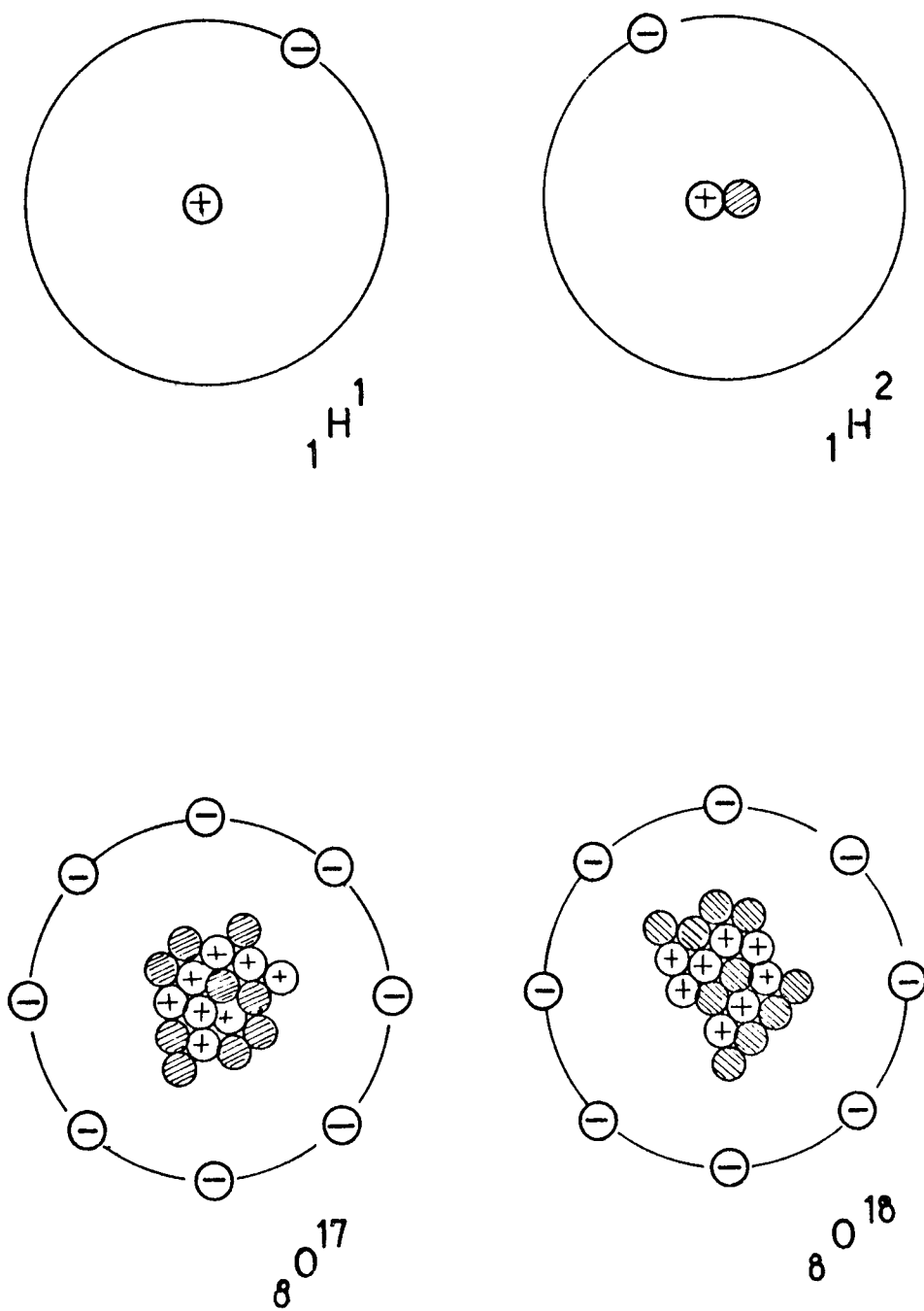


FIG. 1

FIG. 2

T A B L A 1 - I

ELEMENTO	PESO ATOMICO QUIMICO	Z	A	MASA ATOMICA	ABUNDANCIA PORCENTUAL
Hidrógeno	1.008	1	1	1.008146	99.08
			2	2.014741	0.02
			3	3.016997	-----
Helio	4.0026	2	3	3.016997	10 ⁻⁴
			4	4.003879	100
Litio	6.939	3	6	6.01702	7.5
			7	7.01822	92.5
			8	8.02502	-----
Berilio	9.0122	4	7	7.01915	-----
			8	8.00785	-----
			9	9.01504	100
Boro	10.811	5	9	9.01619	-----
			10	10.01611	18.4
			11	11.01280	81.6
			12	12.01816	-----
Carbóno	12.0115	6	11	11.014923	-----
			12	12.003842	98.892
			13	13.00750	1.108
			14	14.00768	-----
Nitrógeno	14.0067	7	14	14.00755	99.64
			15	15.00490	0.36
Oxígeno	15.9994	8	16	16.000000	99.759
			17	17.00453	0.037
			18	18.00488	0.204
Fluor	18.9984	9	19	19.00444	100
Neón	20.183	10	20	19.99877	90.9
			21	21.0005	0.27
			22	21.99838	8.83
Sodio	22.898	11	23	23.00177	100

...///

ELEMENTO	PESO ATOMICO QUIMICO	Z	A	MASA ATOMICA	ABUNDANCIA PORCENTUAL
Magnesio	24.12	12	24	23.99268	78.6
			25	24.99375	10.2
			26	25.99080	11.2
Aluminio	26.9815	13	27	26.99001	100
Silicio	28.086	14	28	27.98582	92.27
			29	28.98570	4.68
			30	29.98331	3.05
Fósforo	30.9738	15	31	30.98362	100
Azufre	32.064	16	32	31.98224	95.02
			33	32.98213	0.75
			34	33.97873	4.21
			36	35.97893	0.02
Cloro	35.453	17	35	34.98006	75.4
			37	36.97767	24.6
Argón	39.948	18	36	35.97900	0.337
			38	37.97491	0.063
			40	39.97515	99.600
Potasio	39.102	19	39	38.97606	93.08
			40	39.97654	0.0119
			41	40.97490	6.91
Calcio	40.08	20	40	39.97545	96.97
			42	41.97216	0.64
			43	42.97251	0.14
			44	43.96924	2.06
			48	47.96778	0.019
Hierro	55.47	26	54	53.95704	5.84
			56	55.95274	91.68
			57	56.95359	2.17
			58	57.9520	0.31
Níquel	58.71	28	58	57.95349	67.76
			60	59.94925	26.16
			61	60.94907	1.25
			62	61.94681	3.66
			64	63.94755	1.16

ELEMENTO	PESO ATOMICO QUIMICO	Z	A	MASA ATOMICA	ABUNDANCIA PORCENTUAL
Cobre	63.54	29	63	62.94926	69.09
			65	64.94835	30.91
Zinc	65.37	30	64	63.94955	48.87
			66	65.94722	27.62
			67	66.94815	4.12
			68	67.94686	18.71
			70	69.94779	0.69
Plata	107.70	47	107	106.9387	51.35
			109	108.9394	48.65
Indio	114.82	49	113	112.94045	4.24
			115	114.94040	95.76
Plomo	207.19	82	204	204.036	1.48
			206	206.039	23.6
			207	207.040	22.6
			208	208.042	52.3
Bismuto	208.980	83	209	209.045	100
Torio	232.038	90	232	232.109	100
Uranio	238.03	92	234	234.113	0.0058
			235	235.116	0.715
			238	238.124	99.28

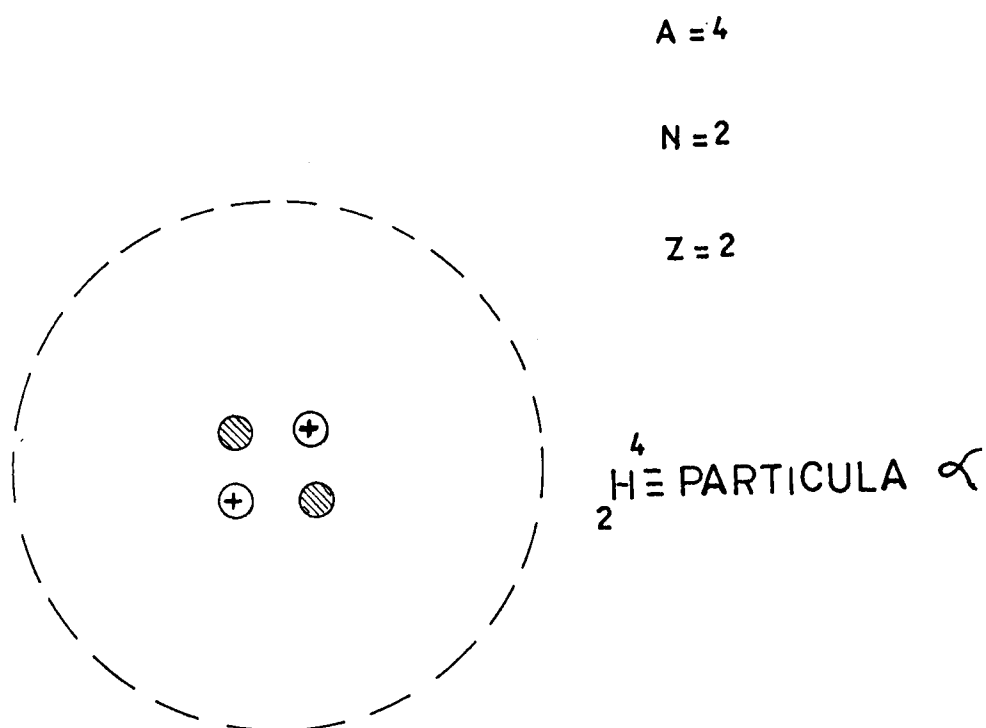


FIG. 4 - NUCLEO DE HELIO

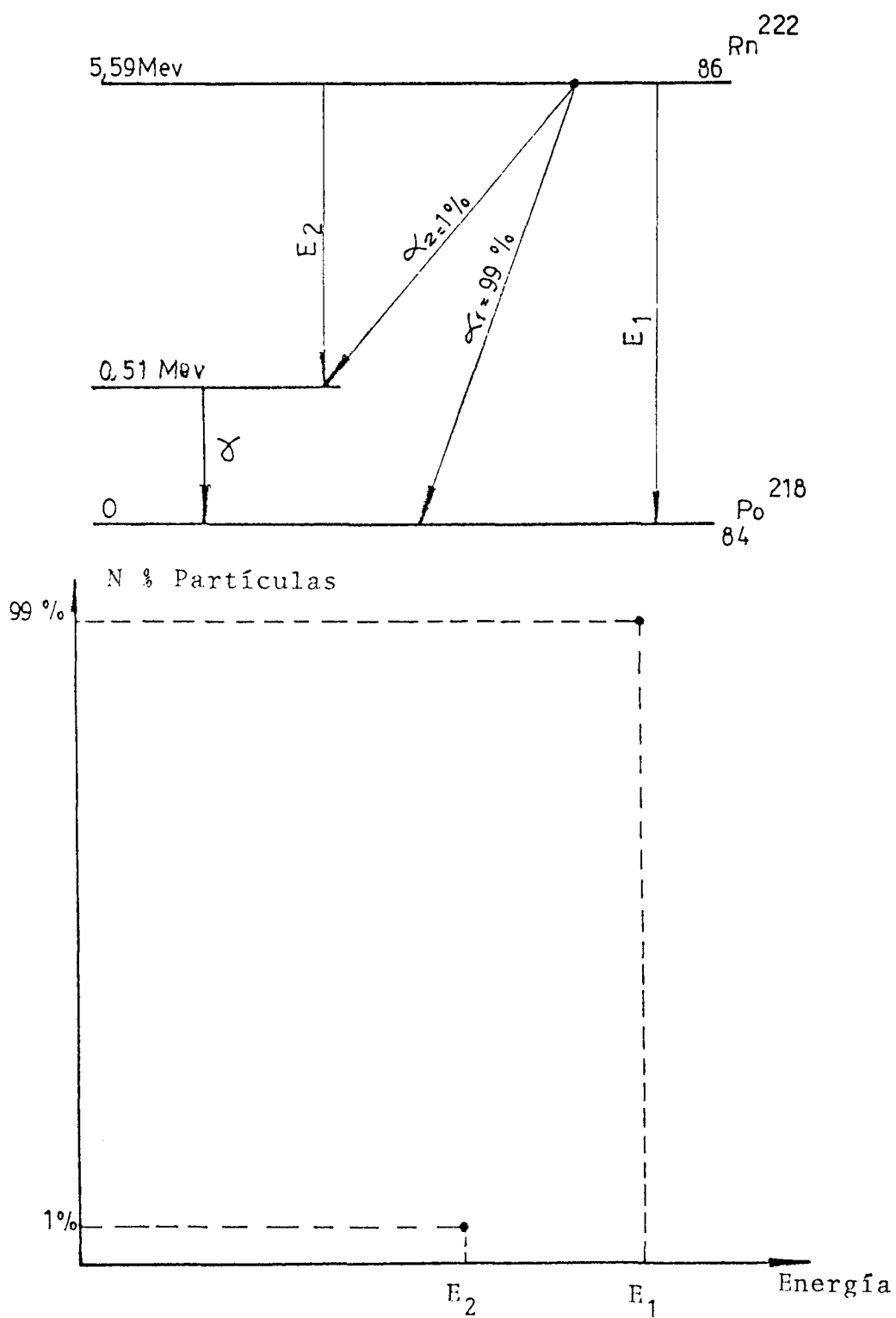
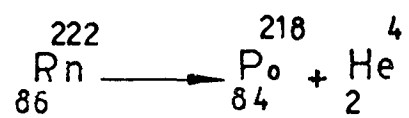


FIG. 5

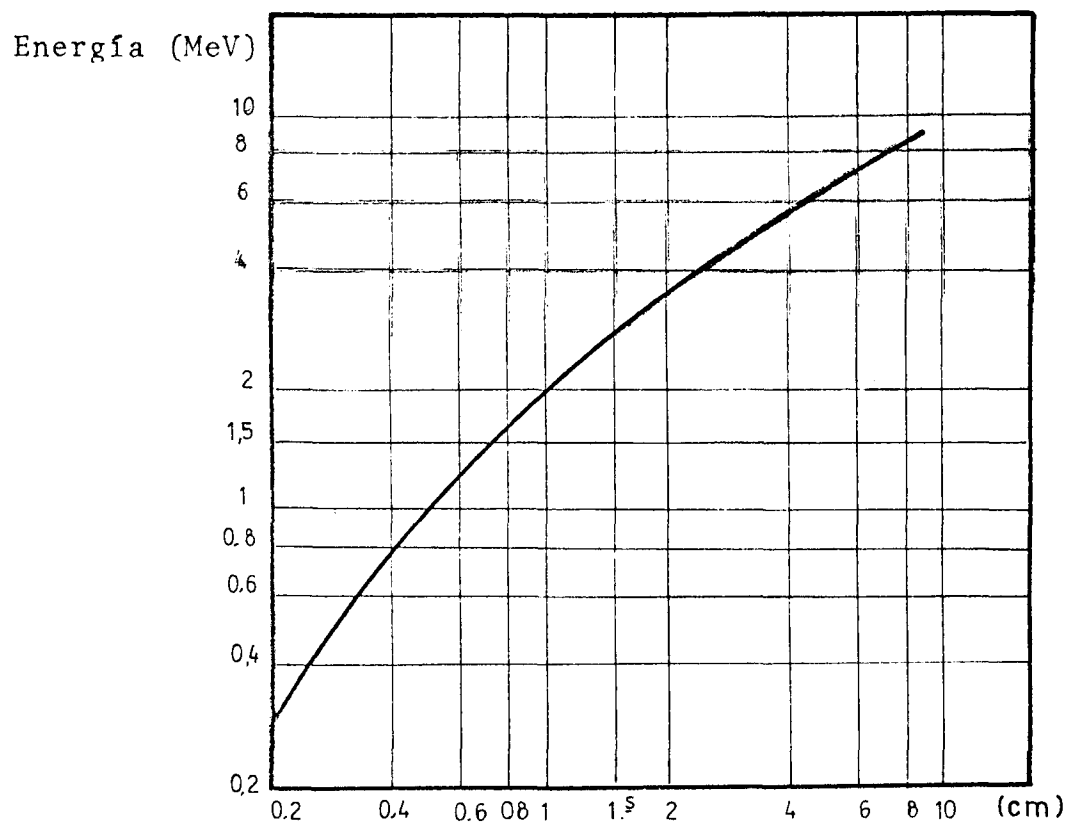


FIG. 6 - Alcance Medio Para Partículas α En Aire

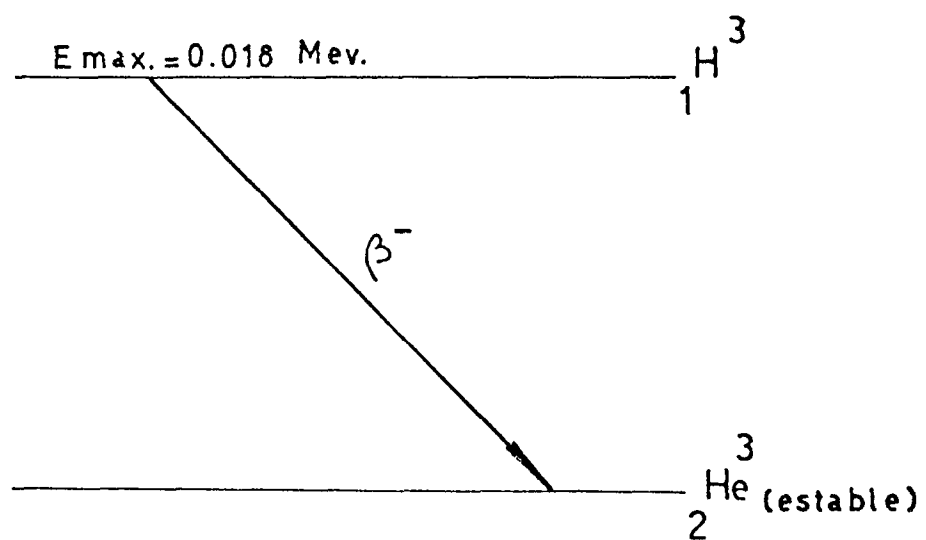
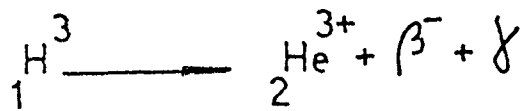
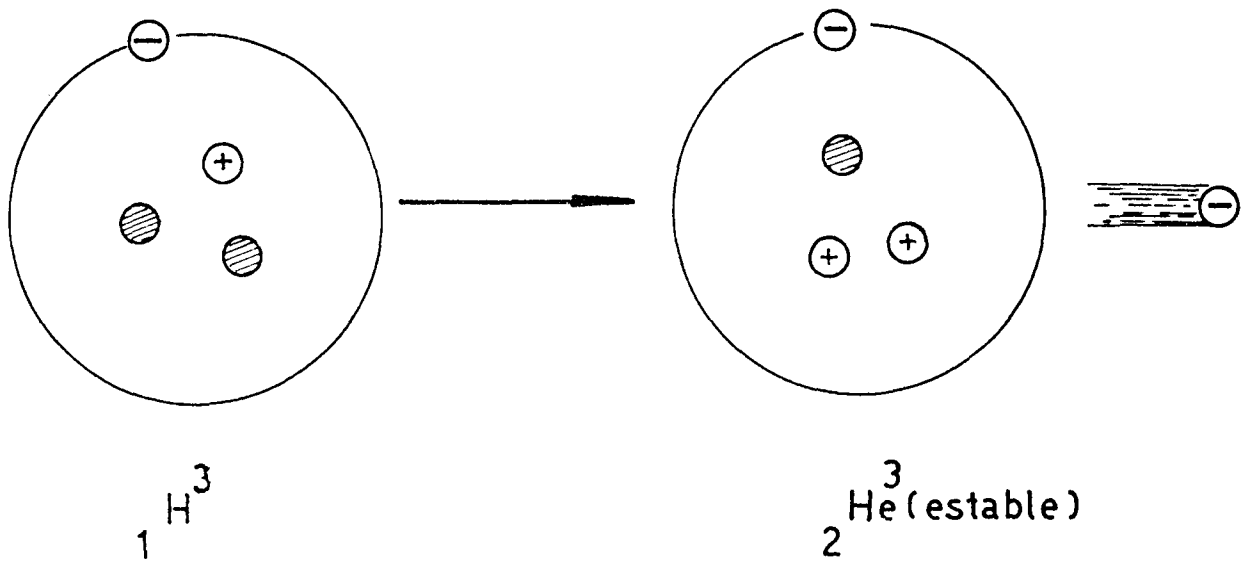


FIG. 7

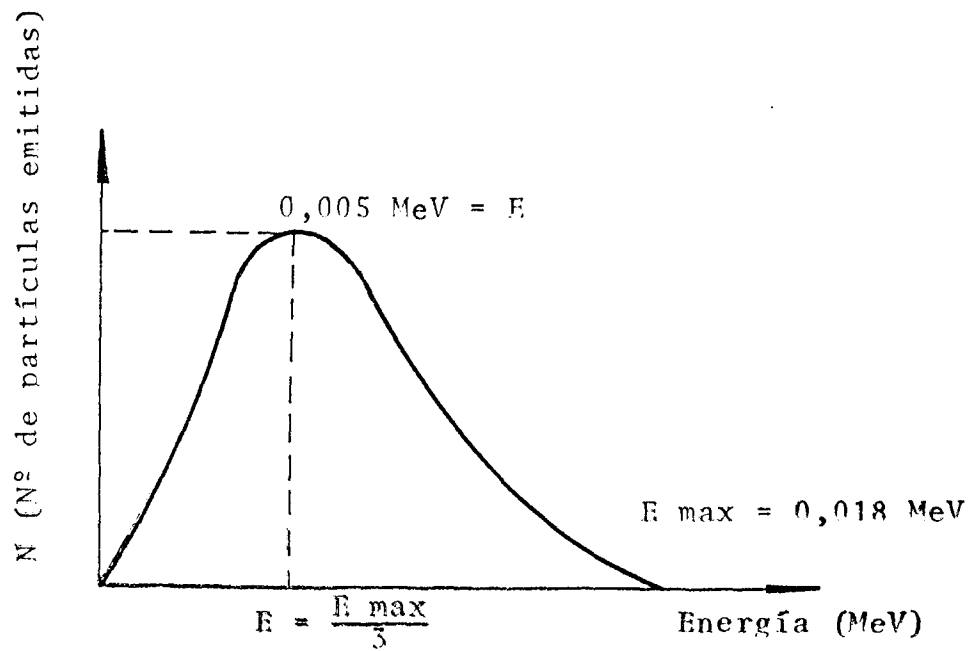


FIG. 8

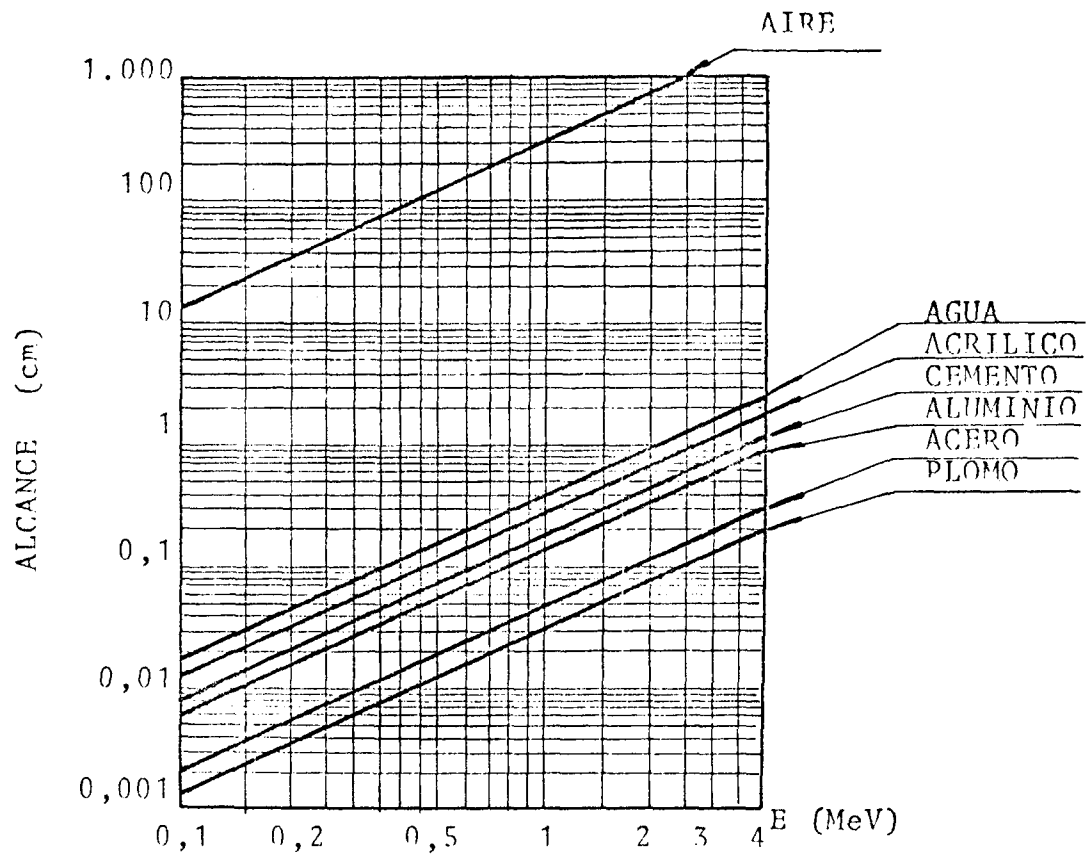


FIG. 9

ALCANCES MAXIMOS PARA ${}_1\text{H}^3$ ($E_{\text{max}} = 0,018 \text{ Mev}$)
 EN DISTINTOS MATERIALES

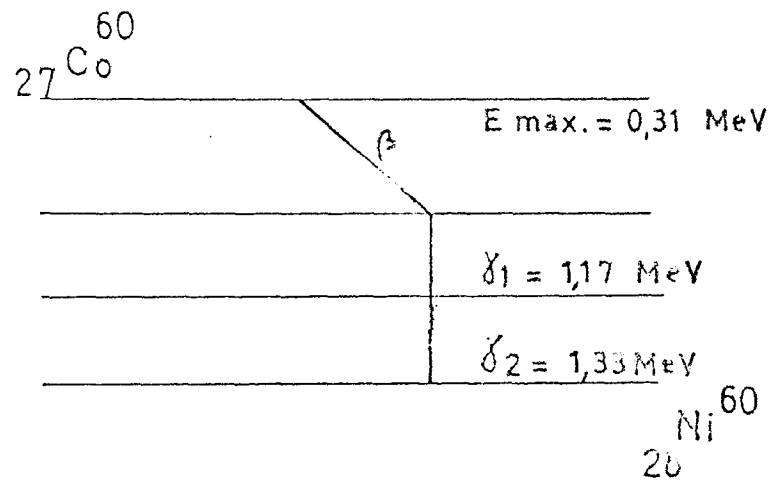
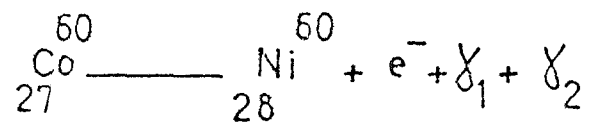
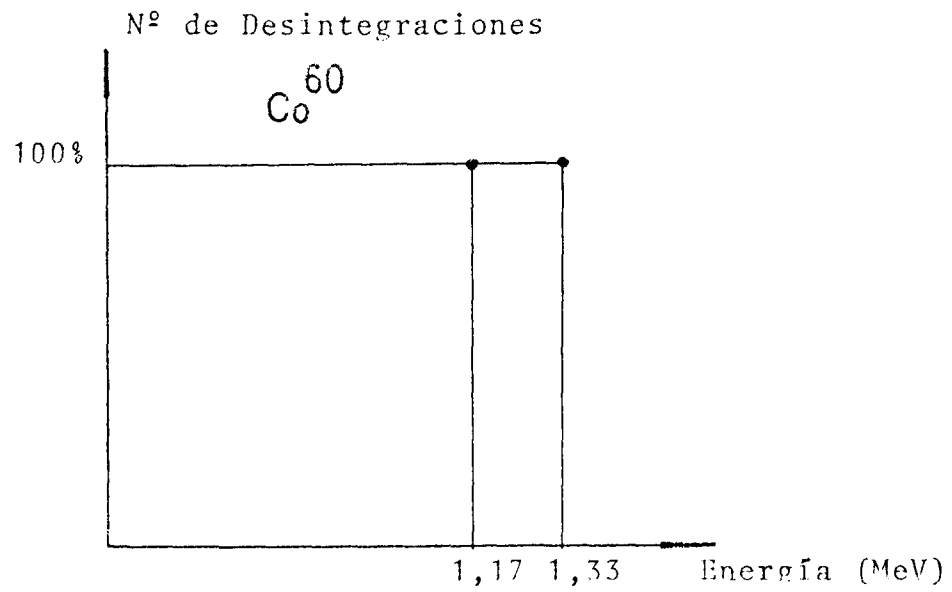
Aire	1,5 mm
H ₂ O	6 μ
Tejido	6 μ (90% de partículas β son absorbi- das en el primer micrón)

FIG. 10

ALGUNOS RADIONUCLEIDOS EMISORES β
 Y SUS ENERGIAS ASOCIADAS

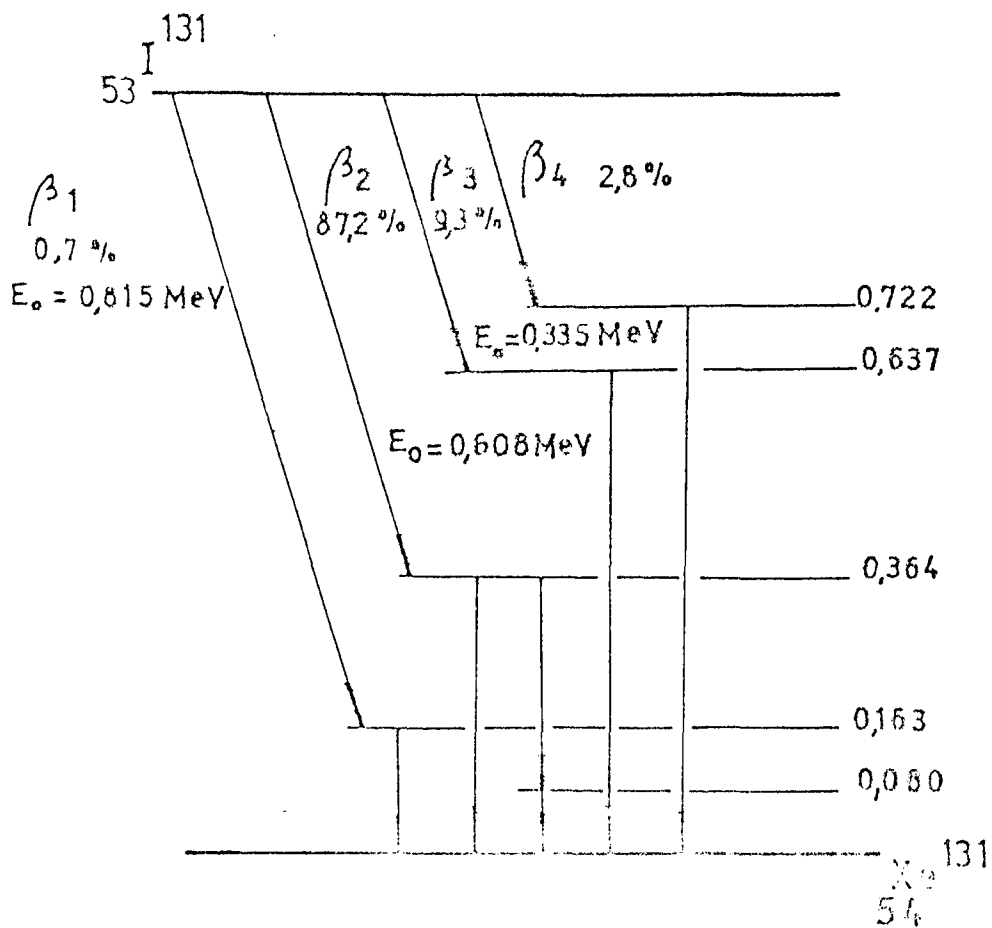
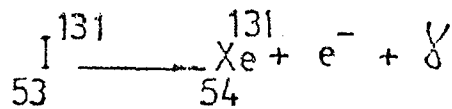
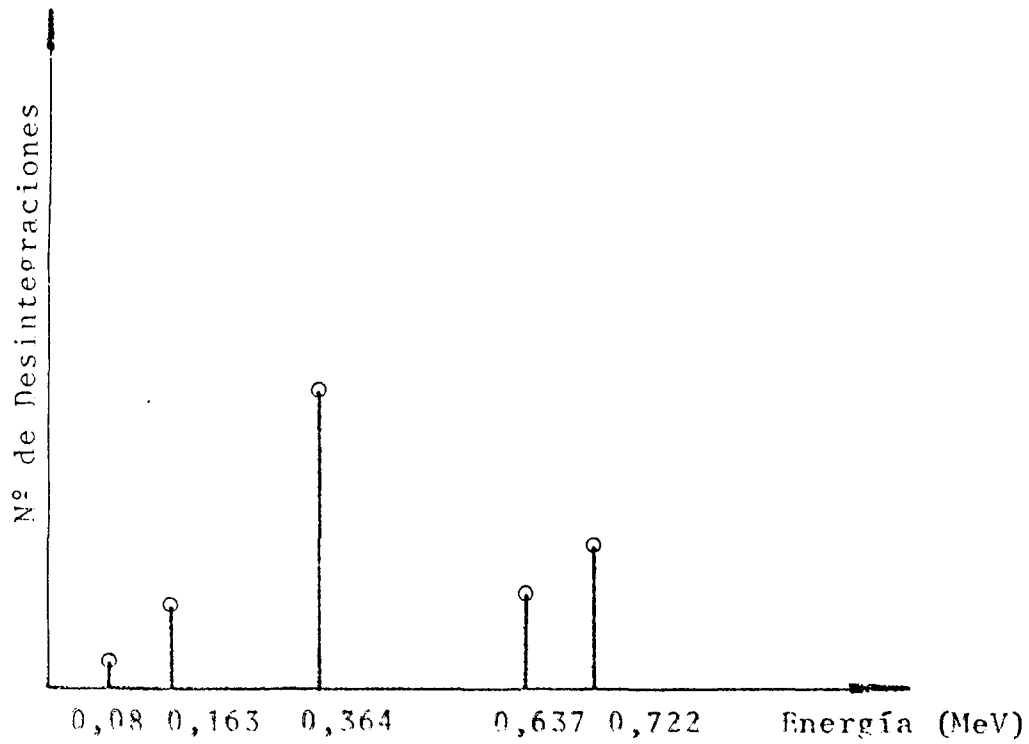
	E_{max} (MeV)	$\bar{E}$ (MeV)
Ca ⁴⁵	0,254	0,076
C ¹⁴	0,154	0,049
Cl ³⁶	0,714	0,24
H ³	0,018	0,006
Na ²⁴	1,392	0,56
P ³²	1,71	0,70

FIG. 11



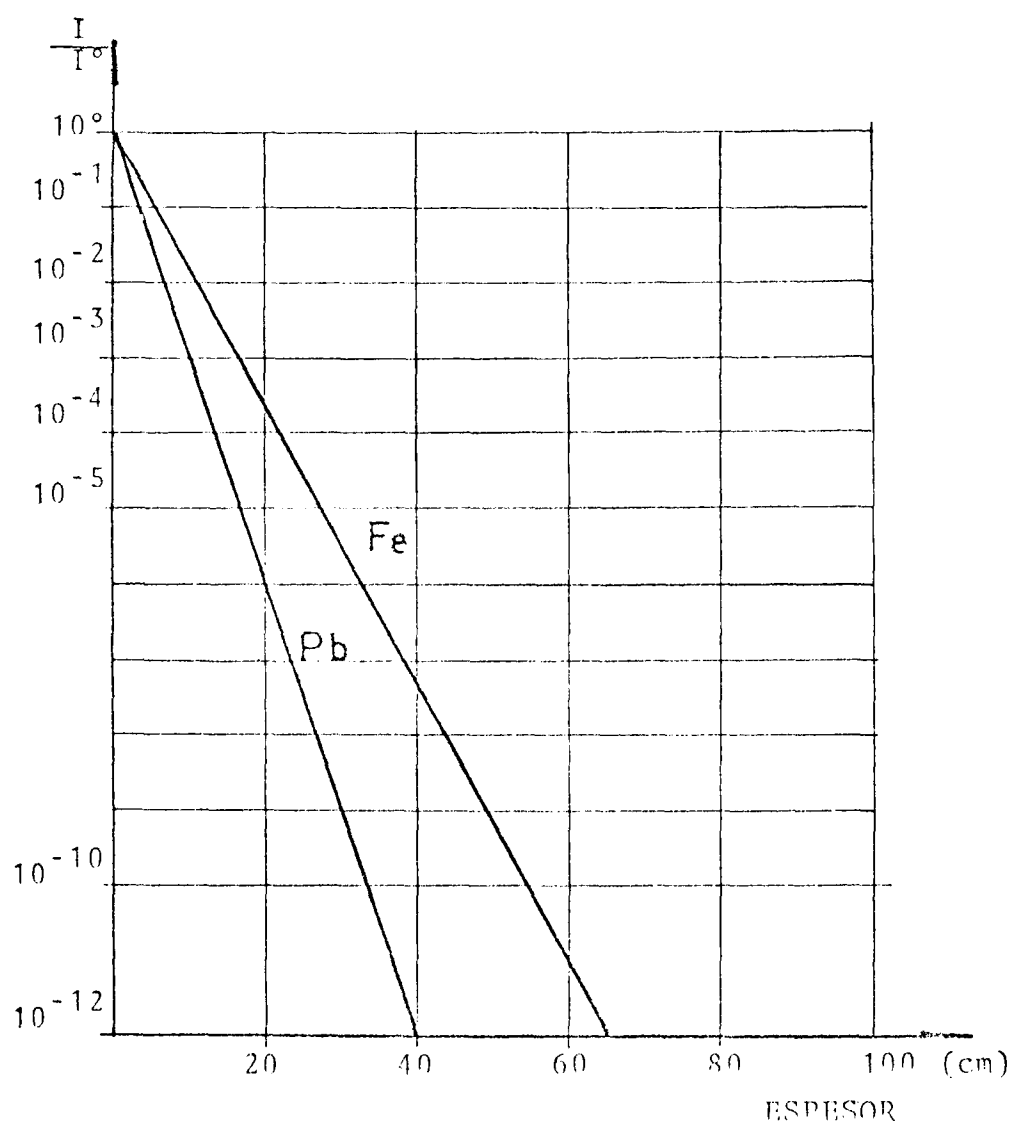
DESINTEGRACION DEL COBALTO 60

FIG. 12



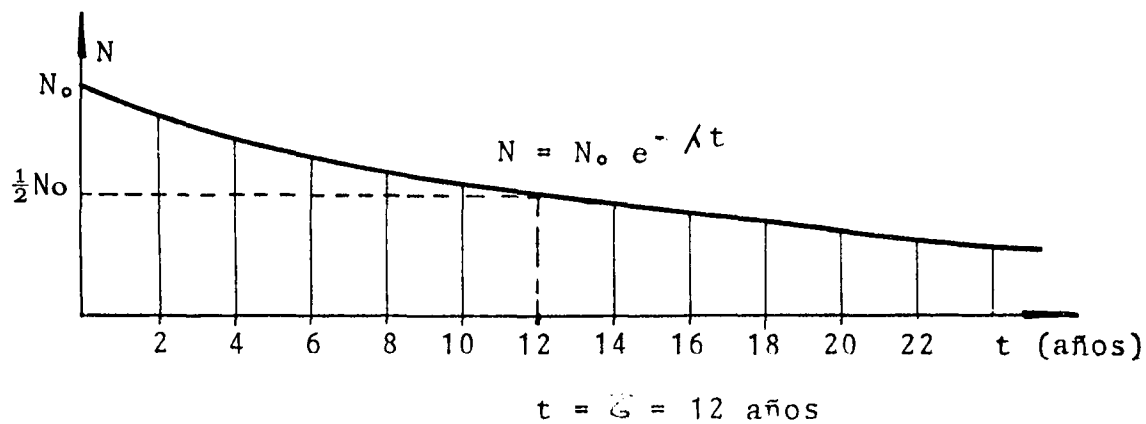
DESINTEGRACION DEL IODO

FIG. 13



ATENUACION DE DISTINTOS MATERIALES PARA LAS RADIACIONES
DE COBALTO 60

FIG. 14



$$T = \frac{0.692}{\lambda}$$

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta T} = N\lambda$$

$$\underline{A = A_0 e^{-\lambda t}}$$

DECAIMIENTO RADIOACTIVO DEL TRITIO

FIG. 15

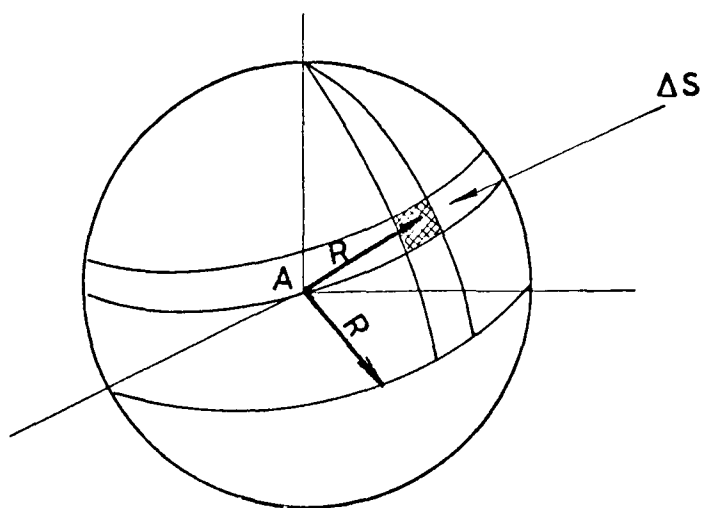


FIG. 16

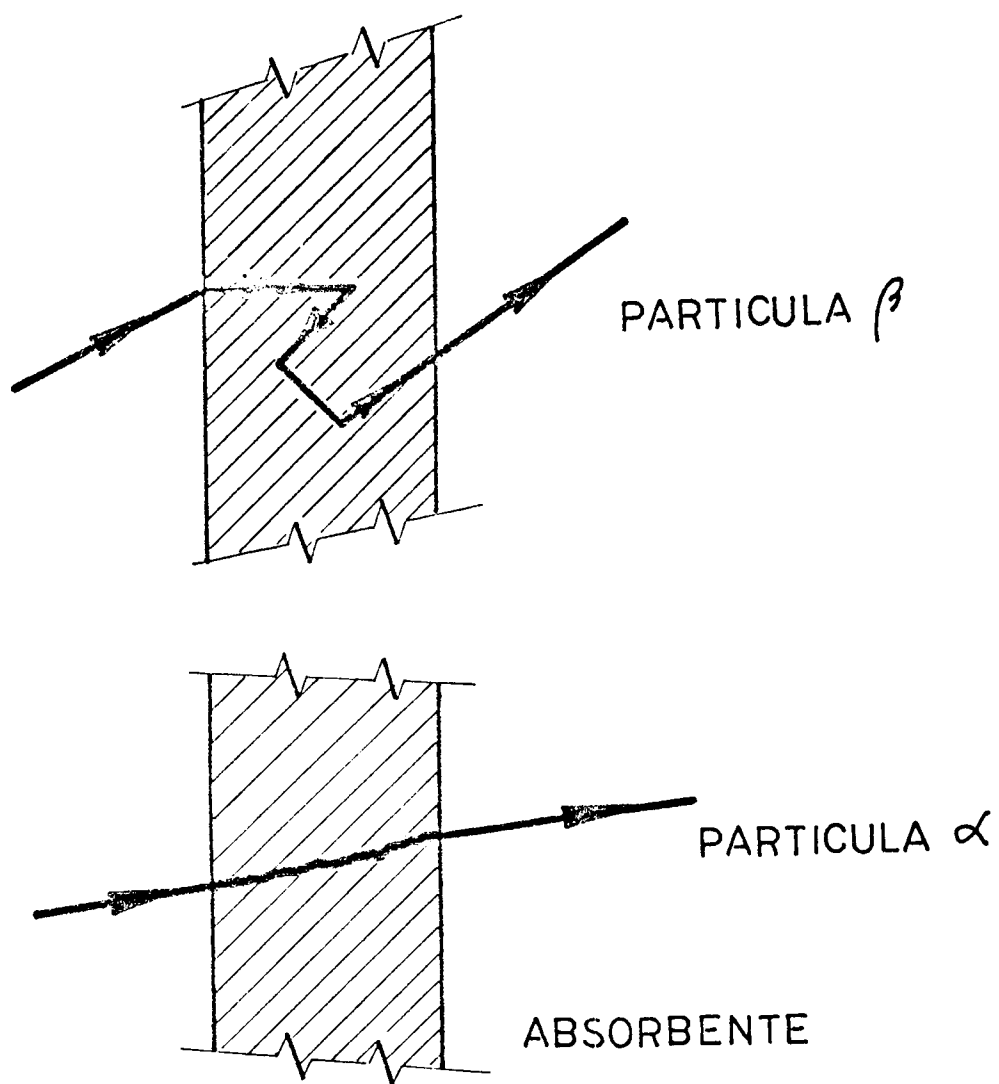
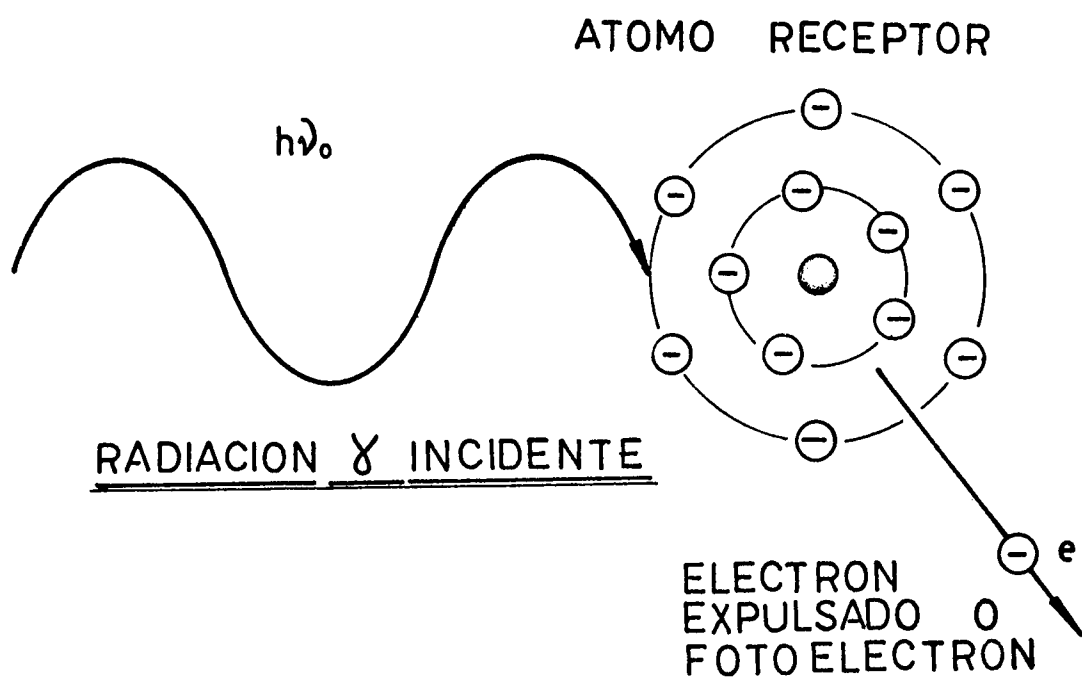
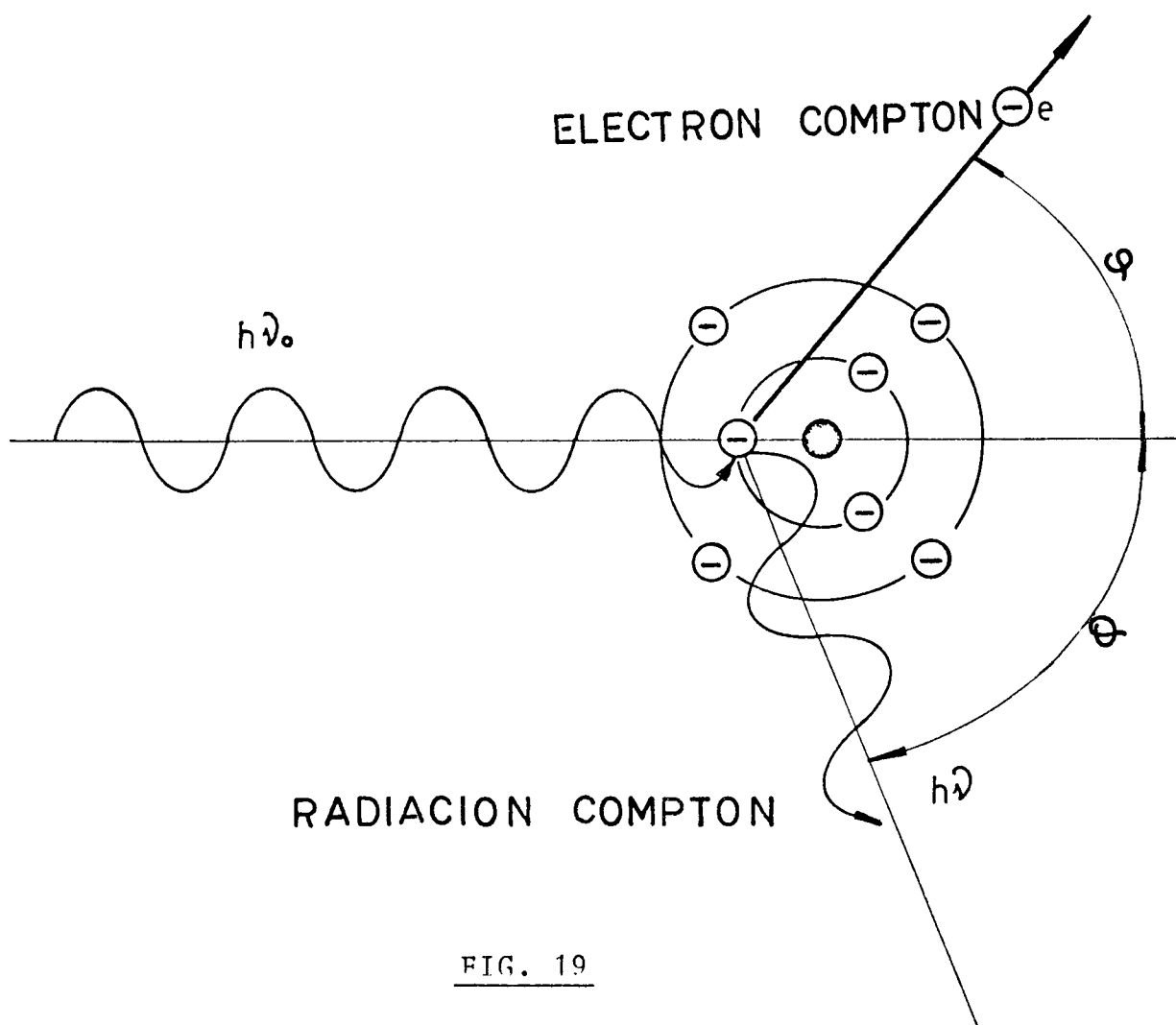
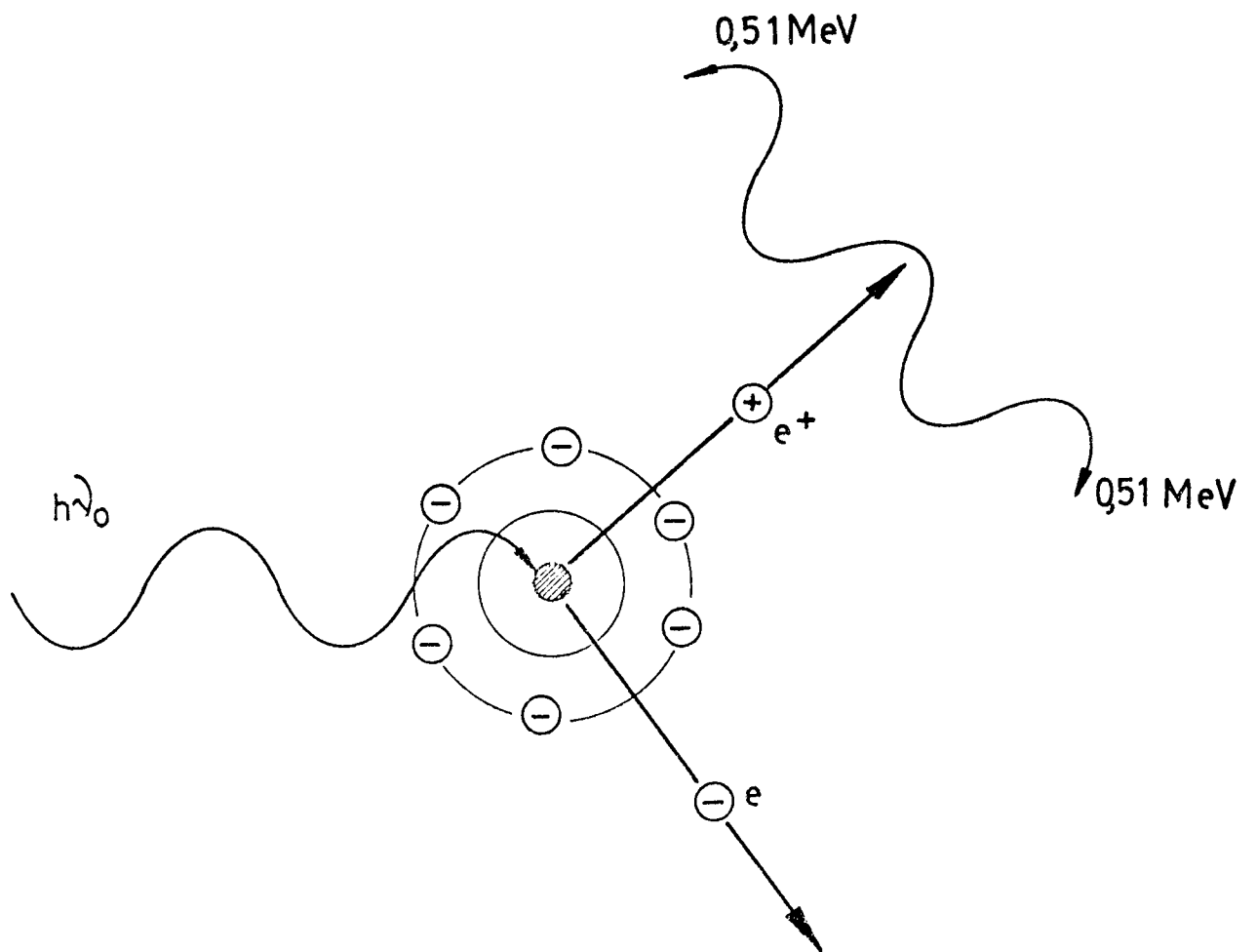


FIG. 17

FIG. 18FIG. 19

FIG. 20

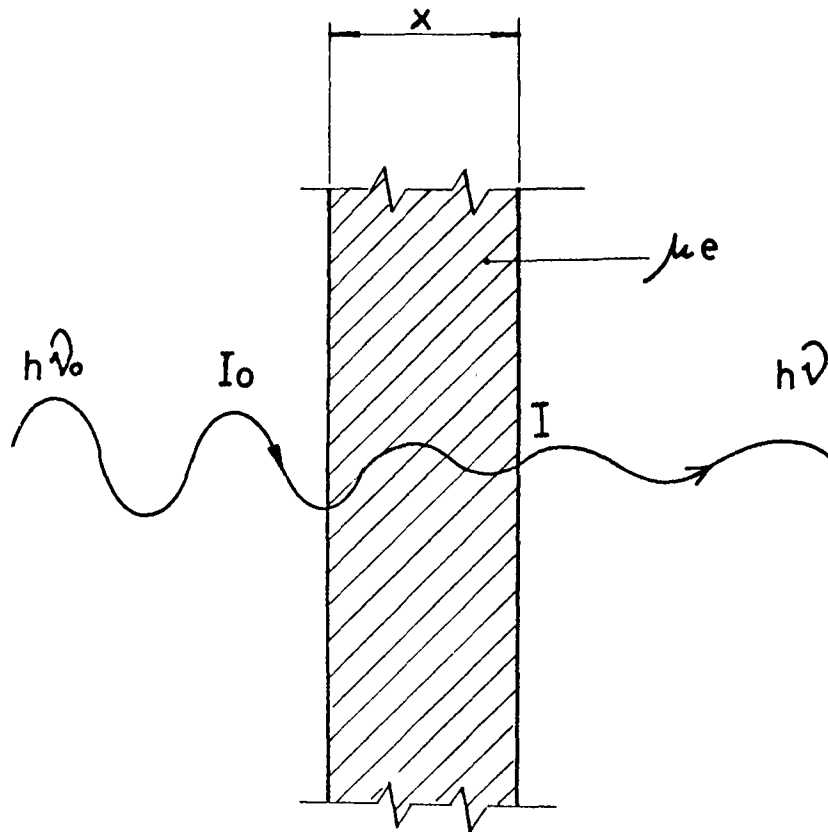
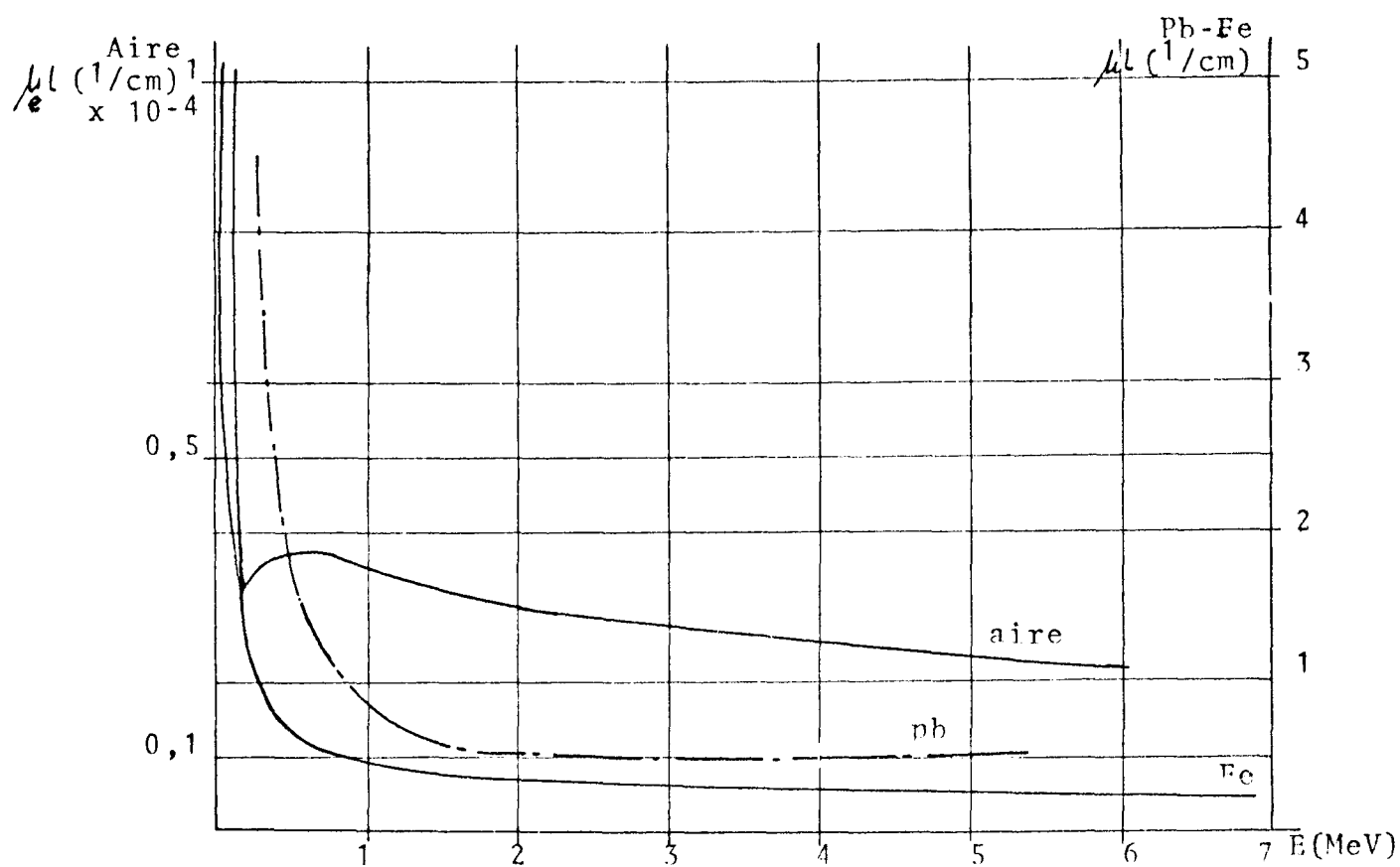


FIG. 21



COEFICIENTES DE ABSORCION (ATENUACION)

FIG. 22

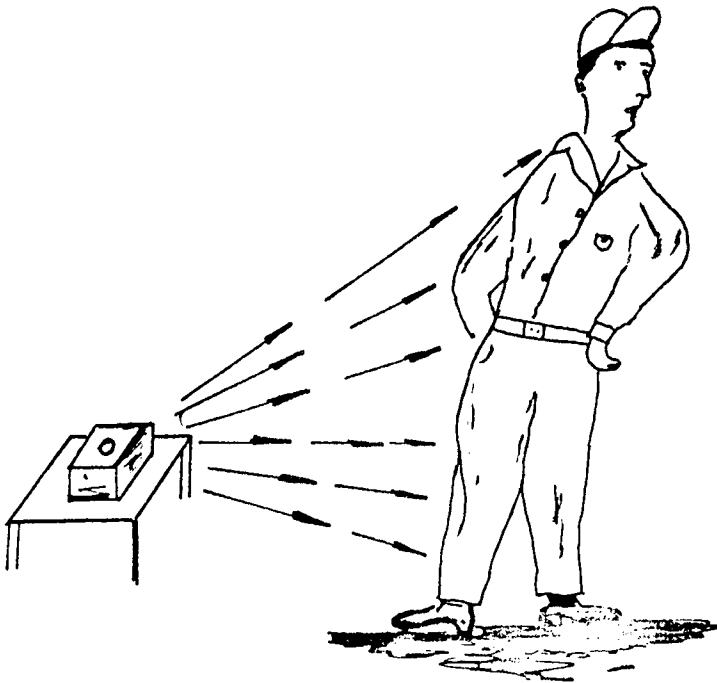
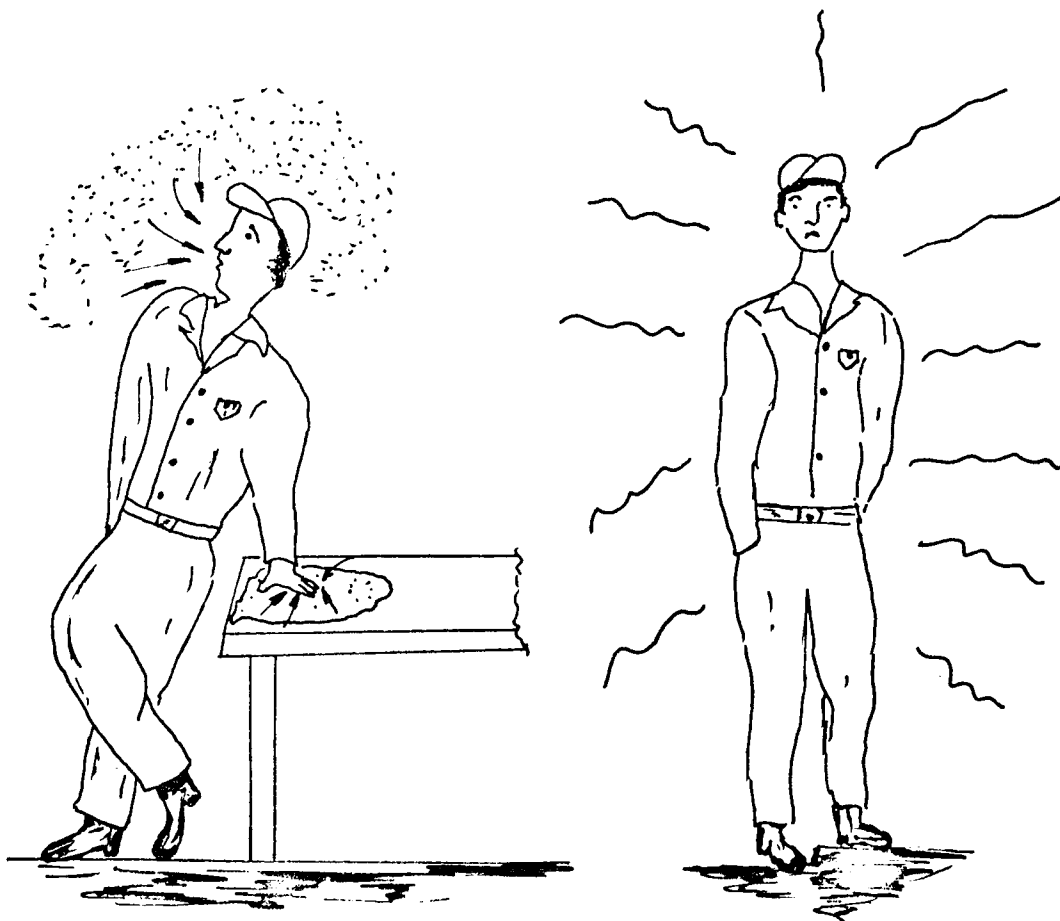
RADIACION EXTERNACONTAMINACION INTERNA

FIG. 23 a

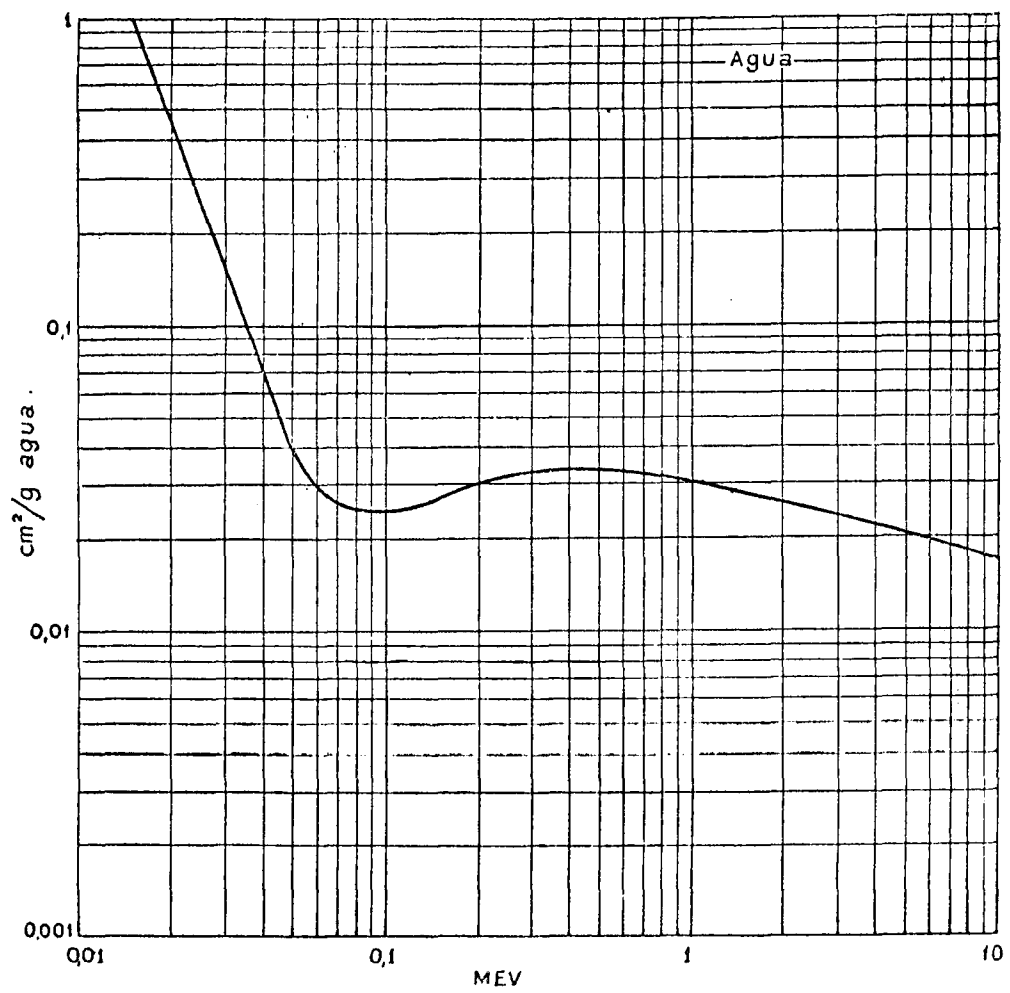


Fig. 22' Coeficiente de absorción másico para agua

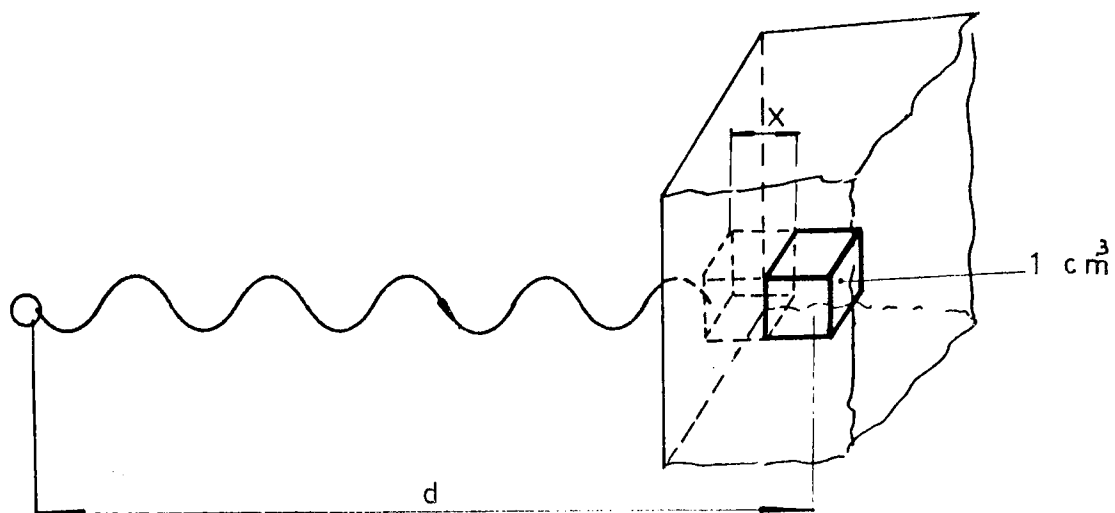
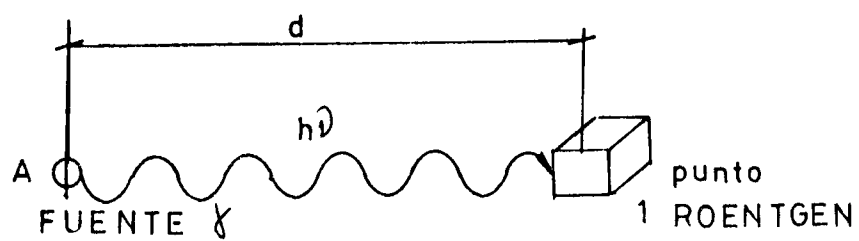
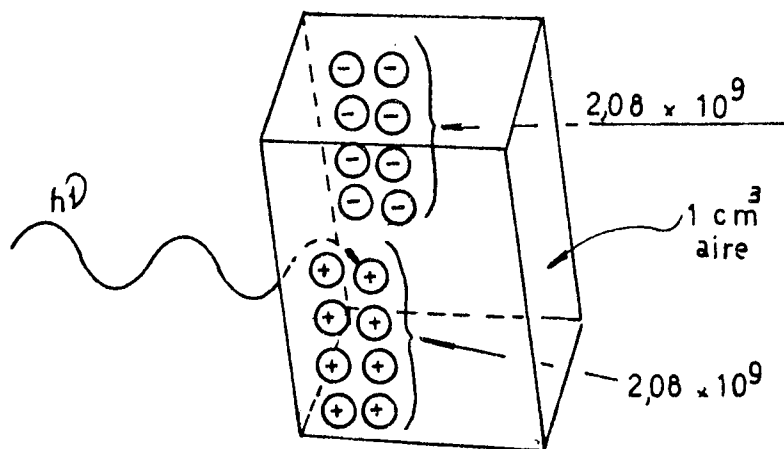


FIG. 23

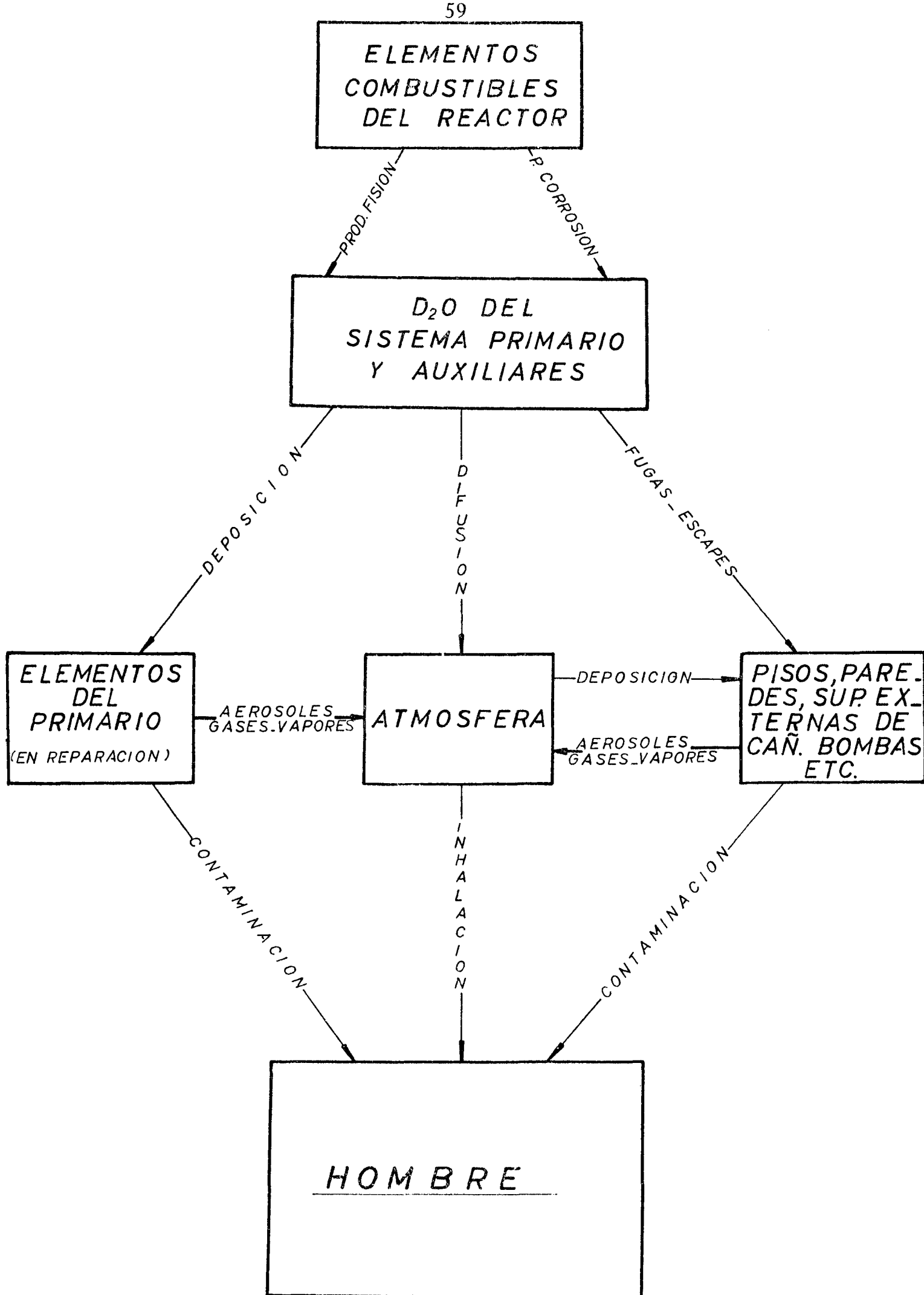


FIG. 24

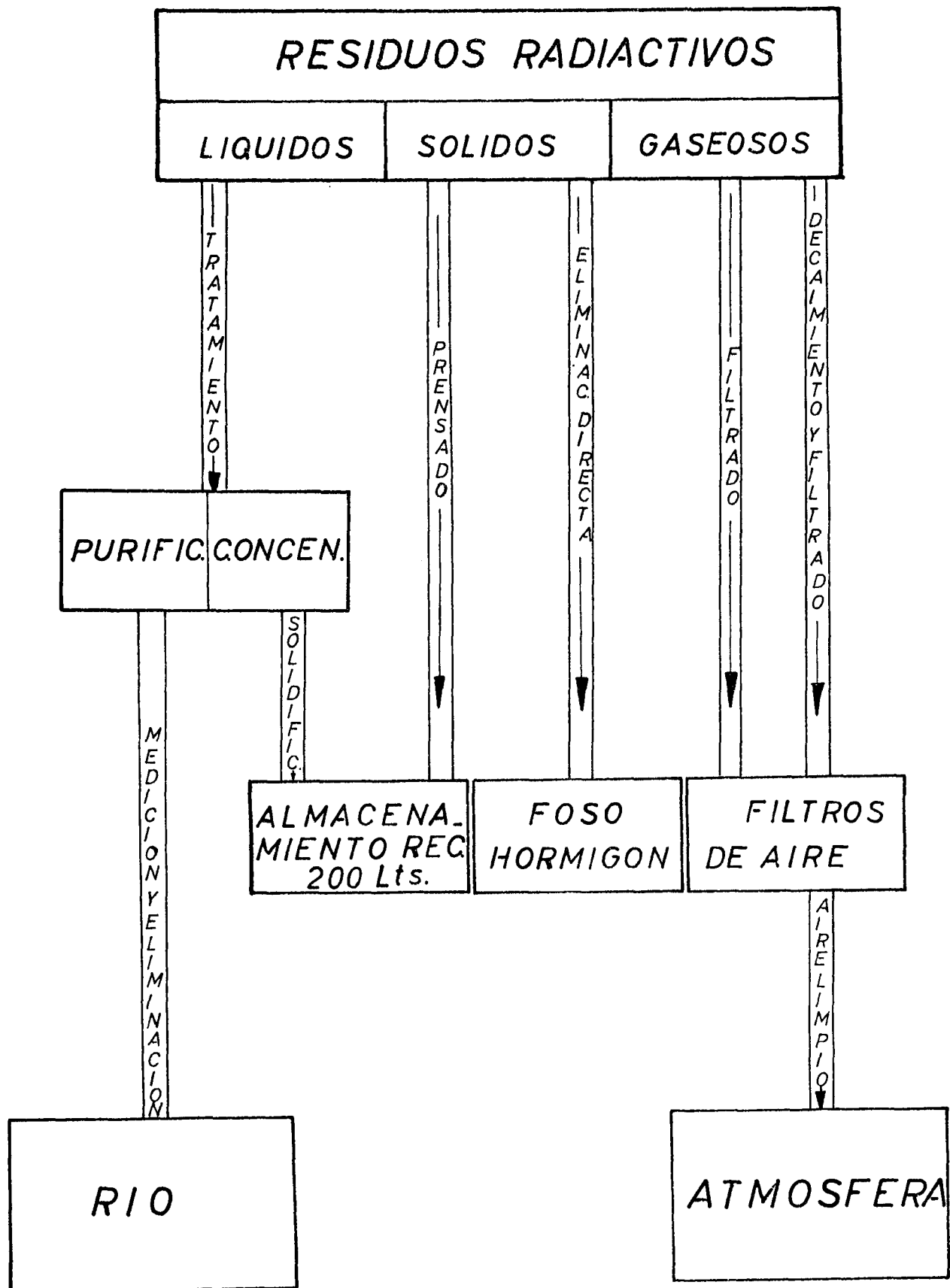
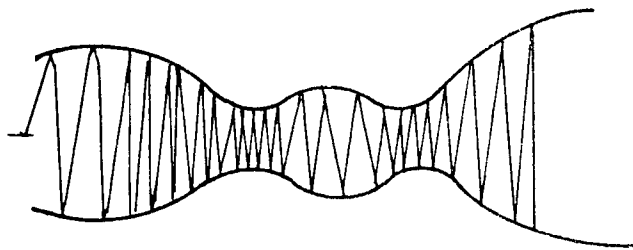


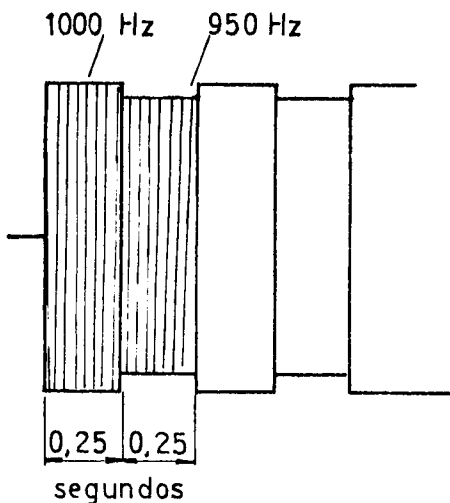
FIG. 25

ALARMAS



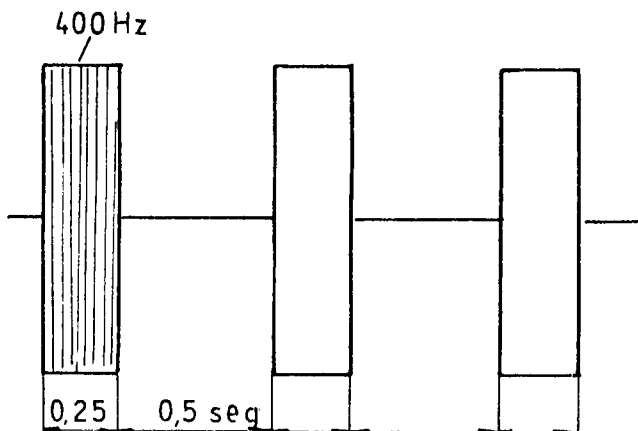
a) Alarma general

Tono de sirena creciente y decreciente (wobulado). El personal deberá dirigirse al hall de escalera lado Este del edificio de maniobras. Deben utilizarse las puertas normales o de emergencia (las más próximas). Para ello basta seguir las flechas indicadas en el piso.



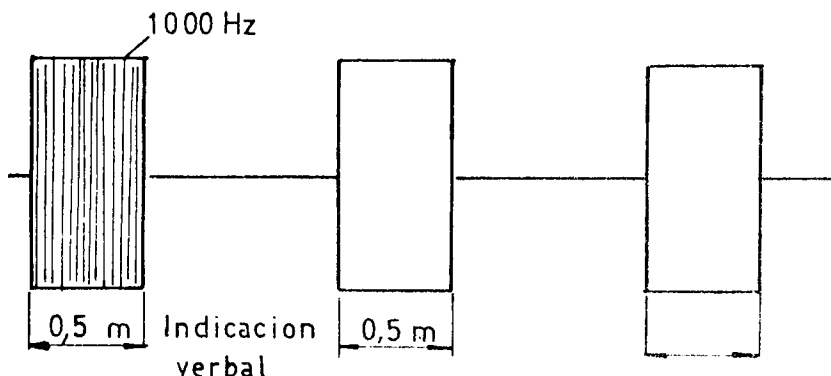
b) Alarma de fuga

Tono cambiante de 950 Hz a 1000 Hz a un ritmo de 2 Hz. El personal deberá abandonar el local donde suena la alarma utilizando eventualmente las puertas de emergencia. Para ello basta seguir las flechas indicadas en el piso. En algunos casos bastará con trasladarse a otro edificio donde la alarma no suena, sin abandonar la zona controlada.



c) Alarma de evacuación

Tono interrumpido de 400 Hz (0,25 segundos de tono, 0,5 segundos de silencio). El personal deberá abandonar sin prisa el local donde suena la alarma. Si la misma tiene lugar en el edificio de auxiliares, deberá abandonarse este a través de la salida normal de zona controlada (12 m). Debe efectuarse el cambio de ropas.



d) Alarma de incendio

Tres emisiones de 1000 Hz, de aprox. 1/2 minuto cada una, separadas entre ellas por indicación verbal del lugar y características del fuego.

Figure 27