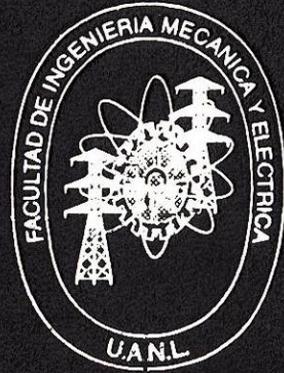


**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA



PROTECCION RADIOLOGICA EN  
CENTRALES NUCLEOELECTRICAS

TESINA  
EN OPCION AL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

PRESENTA:  
DAVID EK COBOS

MONTERREY, N. L.

FEBRERO DE 1997

T

TK1360

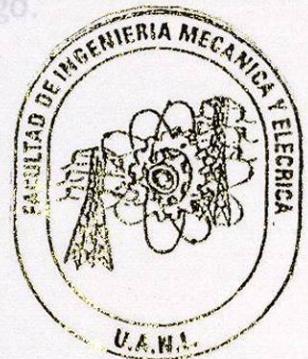
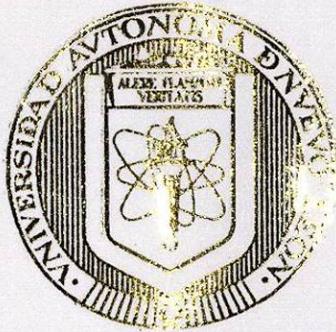
C6

c.1



1080072282

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA



PROTECCION RADIOLOGICA EN  
CENTRALES NUCLEOELECTRICAS

Sra. Angélica Cobos Flores

Con todo cariño y respeto por su apoyo moral que en todo momento me brindó y supo encausarme por el buen camino.

TESINA

EN OPCION AL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

PRESENTA

DAVID DE COBOS

MONTERREY, N.L.

FEBRERO DE 1997

T.  
TK 1360  
C 6



## **AGRADECIMIENTOS**

A DIOS...

Porque en todo momento ha estado conmigo.

A MI MADRE

Sra. Angelina Cobos Flores

Con todo cariño y respeto por su apoyo moral que en todo momento me brindó y supo encausarme por el buen camino.

A MIS ABUELITOS CON CARIÑO:

Sr. Adelaido Cobos Pulido  
Sra. Vicenta Flores Segura ( Finada )

Que me apoyaron haciendo posible la culminación de mis estudios profesionales. Para ellos, que con abnegación y sacrificios lograron darme una carrera profesional.

A MIS FAMILIARES

Con sincero afecto.

A MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS

Por su amistad tan desinteresada  
que me brindan.

A MI ASESOR

Ing. Vicente Cantú Gutiérrez

Por haber aceptado la asesoría  
de esta tesina.

## INDICE

TEMAS:	PAG.
INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES DE LA ENERGÍA ATÓMICA	3
EL ÁTOMO	4
NÚMERO ATÓMICO Y NÚMERO MÁSCICO	8
ISÓTOPOS	8
REACCIONES QUÍMICAS Y NUCLEARES	11
REACCIÓN DE FISIÓN DE URANIO 235	14
CAMBIO RADIOACTIVO	16
FISIÓN NUCLEAR	17
REACCIÓN EN CADENA	21
MATERIALES EMPLEADOS EN REACTORES	22
REACTORES NUCLEARES	23
PROTECCIÓN RADIOLÓGICA	24
MODOS DE PROTECCIÓN	24
TIEMPO	25
BLINDAJE	25
BLINDAJE PARA ALFAS	25
BLINDAJE PARA BETAS	26
BLINDAJE PARA GAMAS	26
BLINDAJE PARA NEUTRONES	28
DOSIS Y RAPIDEZ DE DÓDIS	28
DOSIS DE EXPOSICIÓN	29
DOSIS ABSORBIDA	30
DOSIS BIOLÓGICA	32
CONTAMINACIÓN RADIATIVA	34
CONTAMINACIÓN EXTERNA E INTERNA	35
VIDA MEDIA EFÉCTIVA	36
CLASIFICACIÓN DE AREAS EN UNA CENTRAL NUCLEAR	37
NORMAS REGULADORAS	39
REGLAMENTACIÓN INTERNA	41
DOSIS AGUDA	41

## **INTRODUCCION**

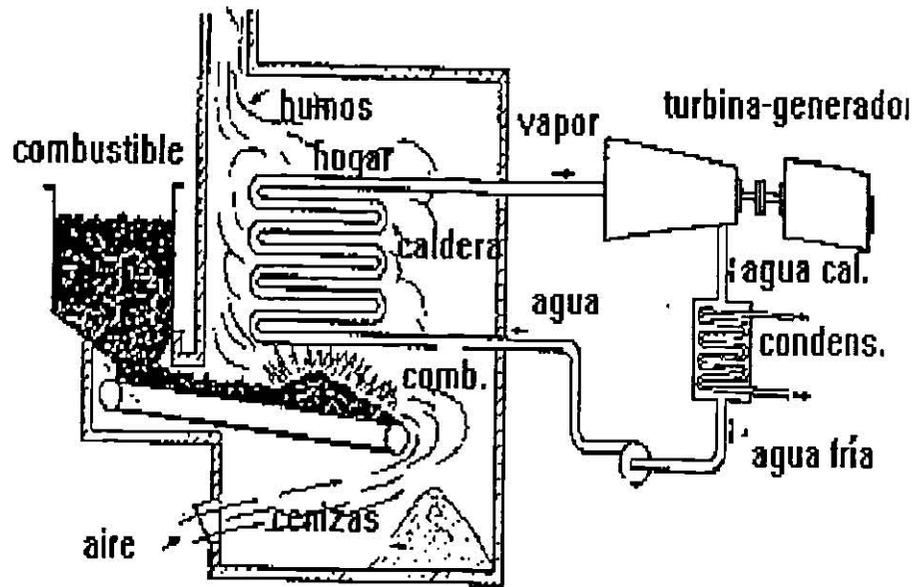
En las centrales termoeléctricas se aprovecha la combustión del carbón para hervir el agua que, a su vez producirá vapor, este vapor introducido a presión en la turbina, accionando los alabes de la misma; forma muy parecida a la acción que tiene el viento sobre las aspas de un molino, esquemáticamente una central térmica consta de:

- Un depósito de combustible.
- Un hogar u horno donde se realiza la combustión, con los distintos dispositivos necesarios para regular esta combustión.
- Una caldera o cualquier otro medio donde calentar el agua fría, pasandola a vapor.
- Un grupo turbina generador para la producción de energía eléctrica.
- Un condensador para el enfriamiento del agua que viene de la turbina.
- Una bomba de recirculación.

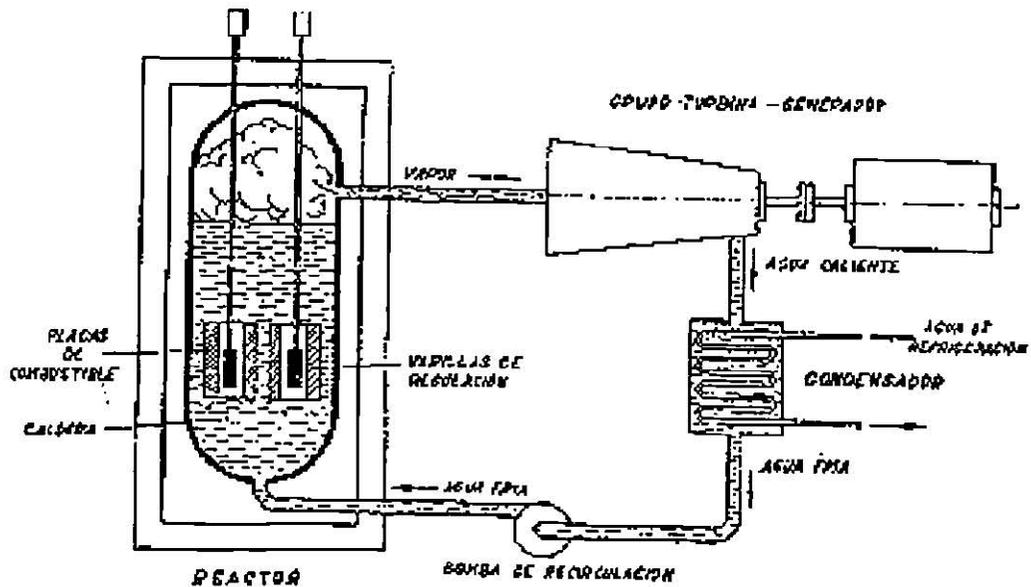
En una central nuclear el combustible es uranio y se aprovecha el calor generado al romper o fisiónar los átomos constituyentes de dicho material . Los elementos de una central nuclear son:

- Deposito de combustible (palcas de uranio).
- Reactor, donde se realizan las fisiones del uranio, con varillas de boro u otro material análogo como regulador.
- un grupo turbina generador.
- un condensador
- una bomba de recirculacion.

## ESQUEMA DE UNA CENTRAL TERMICA CONVENCIONAL



## ESQUEMA DE UNA CENTRAL TERMICA NUCLEAR



## **ANTECEDENTES DE LA ENERGÍA ATÓMICA**

La energía atómica tuvo su origen en el descubrimiento de la fisión del uranio a comienzos de 1939, por el profesor Oho Hahn, director del Instituto de Química Kaiser Wihlelm, de Berlín. El 2 de agosto del mismo año, Albert Einstein escribió una carta al presidente de los Estados Unidos de Norteamérica, Franklin Delano Roosevelt, en la que daba el esquema de una posible bomba atómica. El día 6 de diciembre, el presidente autorizó la organización de un gigantesco proyecto llamado Manhattan, para construir una bomba atómica.

El 2 de diciembre de 1942 se puso en funcionamiento en Chicago el primer reactor de fisión de uranio que funcionaba de manera autónoma. En este momento el género humano entraba a la era atómica. El físico italiano encargado de aquella operación, envió un telegrama a Washington, anunciando el éxito.

El 16 de julio de 1945, a las 5h 30 min., en el desierto de Alamogordo (Nuevo México), explotó la primera bomba atómica con fines experimentales. El 6 de agosto de 1945, los Estados Unidos arrojaron sobre Hiroshima (Japón) la primer bomba atómica con fines bélicos. Pocos días después lanzaron otra bomba sobre Nagasaki (Japón), siendo hasta el momento la última utilizada como arma de guerra. Desde entonces han hecho explotar bombas atómicas en plan experimental.

La primera utilización de la energía nuclear con fines exclusivamente pacíficos no llegó hasta 1956, año en que entró en funcionamiento la central nuclear de Calder Hall (Inglaterra). En la actualidad la energía nuclear sustituye en parte a la caldera de fuel-oil o de carbón en la obtención de la electricidad.

El concepto "átomo", ideado hace unos dos mil quinientos años por el filósofo griego Demócrito, es hoy un contrasentido semántico y científico. Durante mucho tiempo se creyó que toda la materia estaba formada por partículas pequeñísimas indivisibles e indeformables, y que cada elemento tenía sus partículas propias. Solo los alquimistas de la edad media alentaban la esperanza de transformar, con la ayuda de fuerzas mágicas, las partículas de un elemento en otro, por ejemplo, el plomo en oro.

En la actualidad sabemos que el átomo no es indivisible ni intransformable. Lo mas desconcertante fué, sin embargo, la

desaparición del límite entre materia y energía, considerado hasta el momento como indiscutible.

En 1905, Albert Einstein explicaba en su teoría de la relatividad que la materia puede transformarse en energía, puesto que ambas son diferentes manifestaciones de una misma realidad. El grupo más importante de los científicos que contribuyeron al conocimiento de la naturaleza del átomo fue el dirigido por el Neozelandés Ernest Rutherford que trabajaba en el laboratorio Cavendish, en Cambridge. Alrededor de 1911 Rutherford y Niels Bohr dieron a conocer su teoría de la estructura del átomo.

Los electrones tienen una masa muy pequeña, despreciable si se compara con la del núcleo, y carga eléctrica negativa. Normalmente hay en el núcleo la misma cantidad de protones que de electrones que se mueven alrededor de él de manera que las cargas se anulan entre sí y el átomo es eléctricamente neutro. Pero si por alguna razón pierde o gana uno o más electrones, se perturba el equilibrio eléctrico y se transforma en un ion, o sea, en una partícula con carga positiva o negativa. Todos los elementos tienen el mismo tipo de partículas atómicas. Lo que diferencia a un elemento de otro es solo el número de electrones que se mueven alrededor de él.

## ***EL ÁTOMO***

Aún no hace muchos años, se creía que la materia estaba constituida por unas diminutas partículas denominadas moléculas, formadas a su vez, por otras partículas todavía más pequeñas, llamadas "átomos". Las moléculas podían estar formadas por uno, dos, tres o más átomos; también se sabía que las moléculas podían descomponerse en sus átomos individuales. Se decía que no era posible dividir los átomos en unidades aún más pequeñas, y se daba por sentado que los átomos eran partículas indivisibles de la materia.

Algunas de las ideas expuestas son válidas todavía. Pero contra lo que se creía hasta no hace mucho tiempo, el átomo puede romperse o dicho en términos científicos, fisionarse, resultando partículas libres aún más pequeñas. La energía desarrollada al fisionarse los átomos, es la energía atómica que se transforma en calor o energía térmica. Esta energía es la que aprovechamos en las centrales nucleares.

El átomo puede considerarse como un sistema solar en miniatura. En el centro tiene un núcleo, que corresponde al sol de nuestro sistema

solar; y alrededor de este núcleo giran unas partículas pequeñísimas denominadas "electrones" y que vienen a ser como los planetas de este diminuto sistema solar; como ellos, los electrones giran alrededor del núcleo, describiendo las órbitas correspondientes. Los "electrones" tienen carga eléctrica negativa.

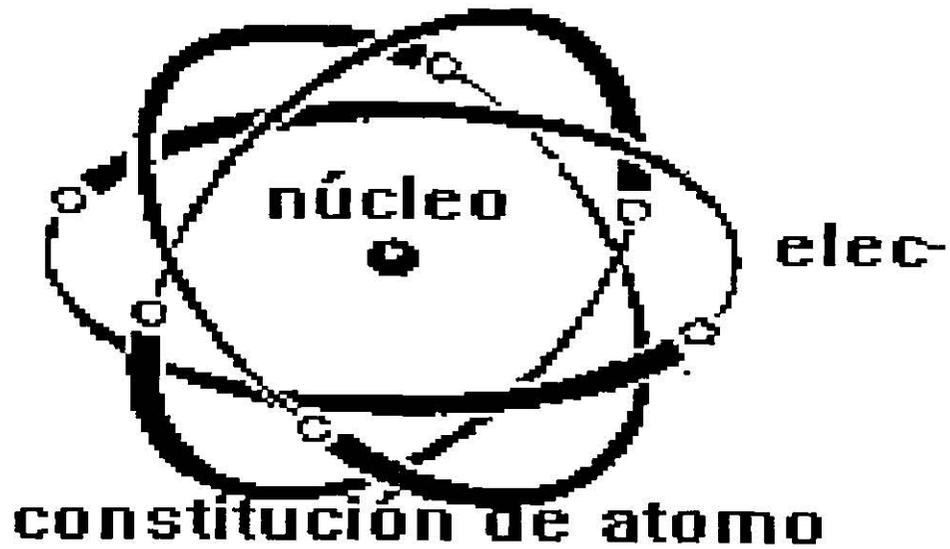
El núcleo está constituido por dos clases de partículas denominadas protones y neutrones. Los "protones" tienen carga eléctrica positiva y los "neutrones" no tienen carga eléctrica. Casi todos los cuerpos que conocemos son neutrones, o sea, no tienen carga eléctrica. Lo cual quiere decir que sus átomos constituyentes son también neutrones; o sea que las cargas eléctricas positivas y negativas están en equilibrio. Es decir, que el número de protones es igual al número de electrones que giran alrededor del núcleo. Solamente cuando se rompe el equilibrio (por ejemplo, por pérdidas de un electrón o por captura de un electrón), el cuerpo se vuelve buen conductor de la electricidad y que adquiere carga eléctrica positiva (pérdidas de electrones) o negativa (captura de electrones). Las fuerzas electrostáticas producidas por las cargas eléctricas positivas y negativas, mantienen el átomo unido, de forma muy parecida a como de la fuerza gravitacional mantiene a los planetas en sus órbitas alrededor del sol. En cuanto a la naturaleza de las fuerzas que mantiene unidas a las partículas que constituyen el núcleo (protones y neutrones), aún no se conoce exactamente; pero sí se sabe que estas fuerzas son un millón de veces más intensas que las fuerzas que mantienen unidos unos átomos con otros.

Todas las materias, cuerpos que podemos conocer, están constituidos exclusivamente por los tres tipos de partículas atómicas, que hemos reseñado: neutrones, protones y electrones. La diferencia que hay entre unos cuerpos y otros es el número de partículas de cada clase que existen en sus átomos constituyentes,

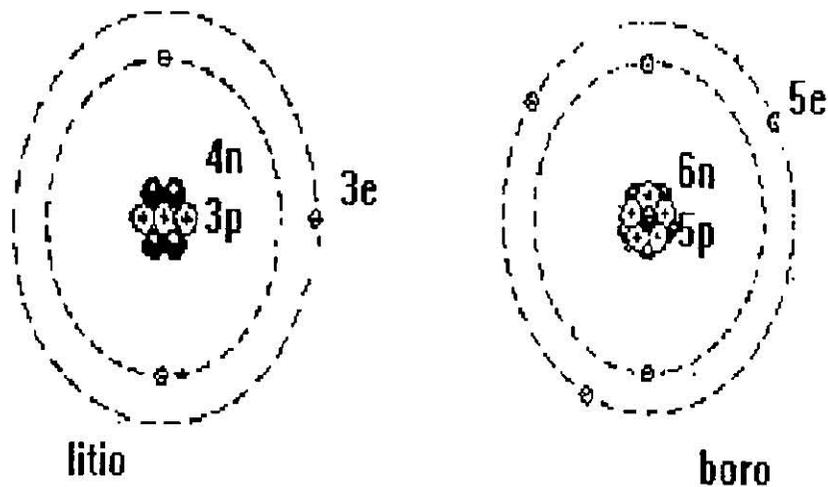
El cuerpo más sencillo que existe es el "Hidrogeno"; un átomo de hidrogeno, consta de un núcleo sencillo constituido por un protón y un electrón orbital. Luego le sigue el "Helio" cuyo átomo consta de un núcleo de 2 neutrones, 2 protones y 2 electrones que giran en su misma órbita. El átomo de "Litio" consta de un núcleo de 4 neutrones, 3 electrones que giran en dos órbitas.

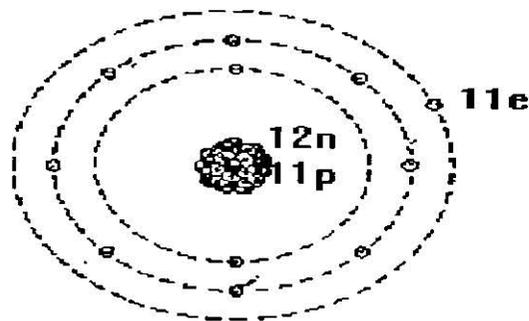
Cada protón o cada neutrón tiene una masa 1840 veces mayor que la de un electrón. El protón tiene la misma masa que un neutrón. La masa del átomo puede suponerse concentrada en el núcleo.

## CONSTITUCION DEL ATOMO

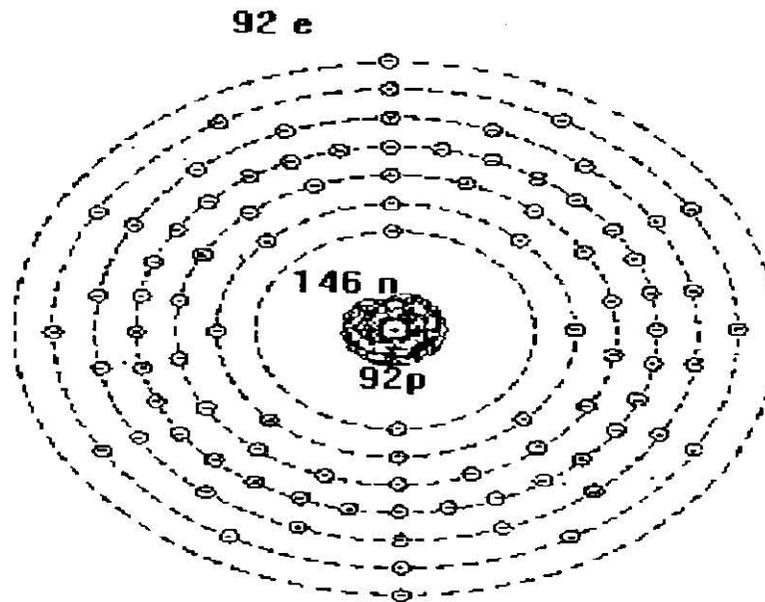


## EJEMPLOS DE DISTINTOS TIPOS DE ATOMOS:





**atomo de sodio**



**atomo de uranio**

Los isótopos más conocidos son el carbono 12, que es el más abundante, y el carbono 13.

Los símbolos son:



El uranio que es, el material mas importante empleado en las centrales nucleares, tiene varios isótopos, siendo el mas abundante , el llamado Uranio 238.



## NUMERO ATÓMICO Y NUMERO MASICO

Cada átomo queda definido con ayuda de dos números:

Número Atómico (Z).- La carga electrónica positiva contenida en su núcleo, por ejemplo, el número atómico del oxígeno es el 8, porque éste es el número de protones contenido en su núcleo.

Número másico (A).- Expreso el número total de partículas contenidas en el núcleo atómico. Por ejemplo, el número masico del Uranio es el 238. El número másico de cualquier elemento, representa también el número de veces que la masa de dicho elemento es mayor que la masa del hidrógeno que se toma como unidad.

**TABLA 1. NÚMEROS ATÓMICOS Y MASICOS DE ALGUNOS ELEMENTOS QUÍMICOS**

<u>CUERPOS</u>	<u>Número Másico A</u>	<u>Número Másico Z</u>	<u>Símbolo Atómico</u>
Hidrógeno	1	1	${}^1_1\text{H}$
Helio	4	2	${}^4_2\text{He}$
Litio	7	3	${}^7_3\text{Li}$
Boro	11	5	${}^{11}_5\text{B}$
Carbono	12	6	${}^{12}_6\text{C}$
Oxígeno	16	8	${}^{16}_8\text{O}$
Sodio	23	11	${}^{23}_{11}\text{Na}$
Uranio	238	92	${}^{238}_{92}\text{U}$

## ISÓTOPOS

Muchas veces sucede que dos átomos tengan el mismo número de protones y el mismo número de electrones exteriores pero diferente número de neutrones en su núcleo, estos dos cuerpos tienen las mismas propiedades químicas pero sus masas son diferentes y también en muchos casos, son diferentes sus propiedades atómicas. A estos cuerpos se les llama isótopos. Los isótopos tienen el mismo número atómico pero diferente número másico.

El hidrógeno tiene un protón y un electrón, a este cuerpo lo llamaremos hidrógeno 1. Pero existen otros tipos de hidrógeno (isótopos), uno denominado deuterio, cuyo núcleo consta de un protón y un

neutrón. Existe otro isótopo de hidrogeno denominado tritio, cuyo núcleo consta de un protón y dos neutrones.

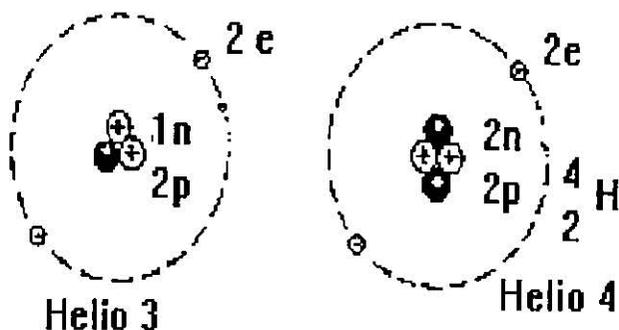
HIDROGENO  ${}^1_1\text{H}$  DEUTERIO  ${}^2_1\text{H}$  TRITIO  ${}^3_1\text{H}$

Normalmente el más abundante es el HIDRÓGENO 1; la proporción de deuterio es de 1 parte por cada 6,700 partes de Hidrógeno 1 y la proporción de tritio es aún menor. En realidad , lo que llamamos hidrógeno no es más que una mezcla de estos tres isótopos; pero como la cantidad de hidrógeno 1, es mucho mayor podemos considerar que las propiedades de esta mezcla son iguales a las del hidrógeno 1.

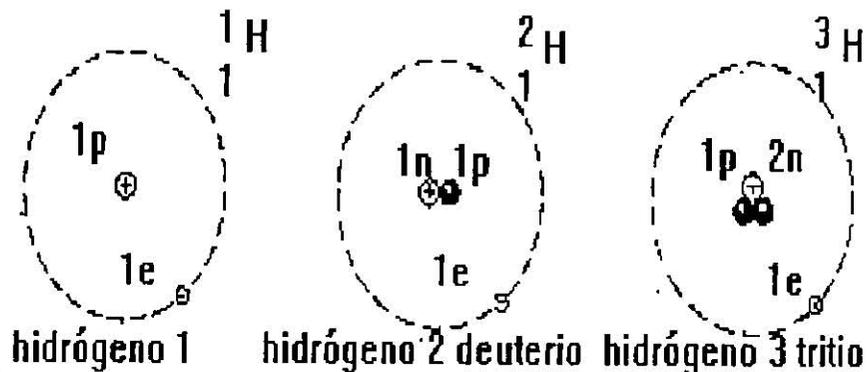
El Helio tiene dos isótopos: el helio ordinario o helio 4 tiene dos protones y 2 neutrones y el helio 3 tiene 2 protones, pero solamente 1 neutrón, se representan:

${}^4_2\text{HELIO}$   ${}^3_2\text{HELIO}$

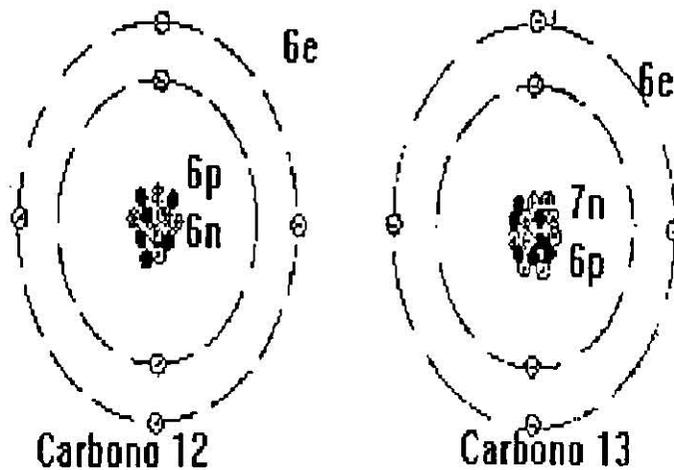
### ISOTOPOS DE HELIO



### ISOTOPOS DE HIDROGENO



### ISOTOPOS DE CARBONO



### REACCIONES QUÍMICAS Y NUCLEARES

Durante la combustión, cada átomo de carbono se combina con dos átomos de oxígeno contenido en el aire, formando así una molécula de anhídrido carbónico. El núcleo central de cada átomo de la molécula no sufre variación. Son los electrones exteriores, que giran alrededor de los núcleos centrales (3) de la molécula de anhídrido carbónico.

Al iniciarse la reacción química, se partió de núcleos de carbono y oxígeno y al terminar la misma reacción, se obtiene núcleos de carbono y oxígeno pero unidos entre sí por la reacción de los electrones exteriores. El cuerpo resultante tiene diferentes propiedades que el oxígeno y el carbono considerados individualmente pero está constituido por átomos de oxígeno y carbono.

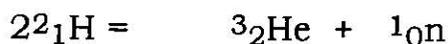
La energía existente en el átomo se debe al movimiento de electrones alrededor del núcleo central. La molécula obtenida por reacción química de varios átomos contiene cierta cantidad de energía. La energía contenida en una molécula de anhídrido carbónico es siempre menos que la suma de las energías existentes en los tres átomos, uno de carbono y dos de oxígeno. La energía que es emitida por la reacción química se denomina energía calorífica.

Cuando se combinan dos átomos de hidrógeno se obtiene una molécula de hidrógeno. Ahora, los dos electrones giran alrededor de los núcleos, en vez de girar uno de ellos alrededor de su núcleo propio. Ahora la molécula de hidrógeno tiene menos energía que la suma de las energías contenidas en los átomos porque parte de la energía se ha transformado en energía calorífica.

Al combinarse los átomos de deuterio, también ocurre que cada uno de los núcleos constituyentes de la molécula de deuterio permanecen individuales e inalterables. También se libera energía calorífica al producirse la reacción química. Pero supongamos que podemos conseguir el choque de dos átomos de deuterio impulsados a gran velocidad. En este caso los dos núcleos se juntarán por un instante, haciendo que reboten las partículas que constituyen los átomos. Se puede conseguir que un neutrón salga despedido, mientras que el neutrón restante quede retenido en el nuevo núcleo formado, junto con los dos protones originales. Se ha producido una Reacción Nuclear, vemos ahora las consecuencias. En primer lugar, el nuevo núcleo formado resulta de la Fusión de dos núcleos individuales de deuterio menos el neutrón perdido, como existen dos protones en el núcleo se conservan los electrones orbitales cuyas cargas negativas compensan y equilibran las cargas positivas del núcleo, de otra forma queda:

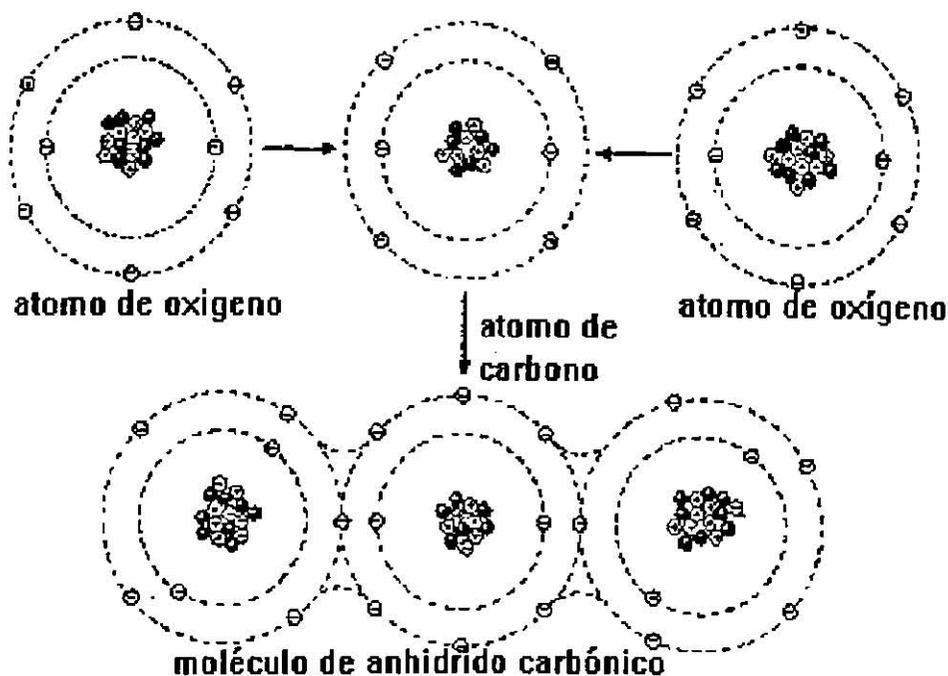


Así se llega a un nuevo cuerpo simple, denominado Helio:

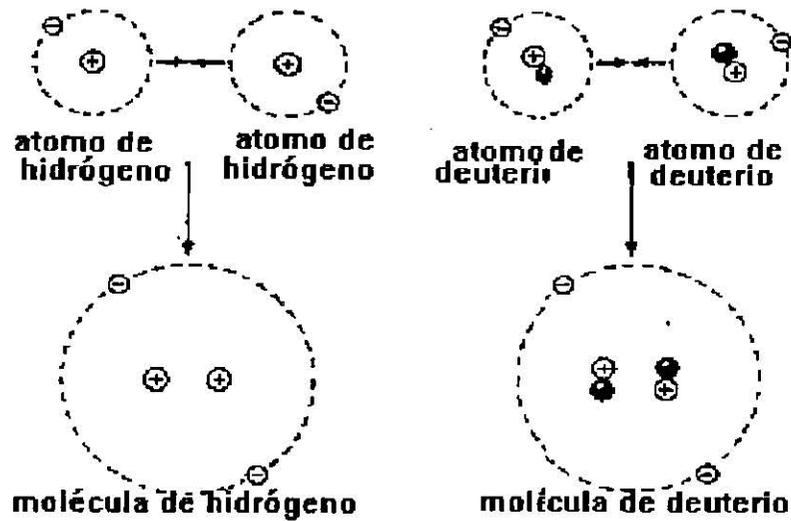


La segunda consecuencia, como a muchas reacciones nucleares es que se desprende una cantidad mucho mayor de energía térmica, unos 50 millones de veces mayor que en una reacción química. La diferencia entre una reacción nuclear y las reacciones químicas, es que en las segundas se obtienen moléculas de átomos de cuerpos simples. Mientras que en las reacciones nucleares se obtienen otros átomos de distinta constitución nuclear que los átomos primitivos.

### **EJEMPLOS DE REACCIÓN QUÍMICA: Combinación química de oxígeno y carbono para formar anhídrido carbónico.**

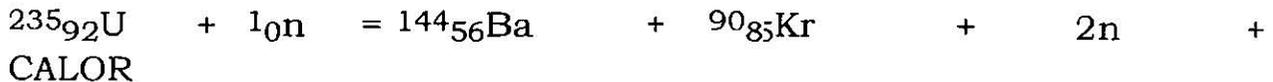


## FORMACIÓN DE MOLÉCULA DE HIDROGENO Y DEUTERIO



## REACCIÓN DE FISIÓN DEL URANIO 235

Hemos partido de dos núcleos de deuterio que se han fusionado en un sólo núcleo de Helio. La reacción nuclear así producida se denomina fusión y se caracteriza porque al finalizar la reacción existen menos átomos que cuando inició. El proceso inverso de la anterior se denomina Fisión, es decir ruptura. En la fisión al finalizar la reacción existen más átomos que al principio. La fisión del Uranio 235 necesita de un neutrón que se mueva a gran velocidad, de acuerdo a la colisión se tiene como resultado un átomo de Bario 144, otro de Kriptón 90 y dos neutrones libres, que se desprenden del núcleo, además se obtiene calor:

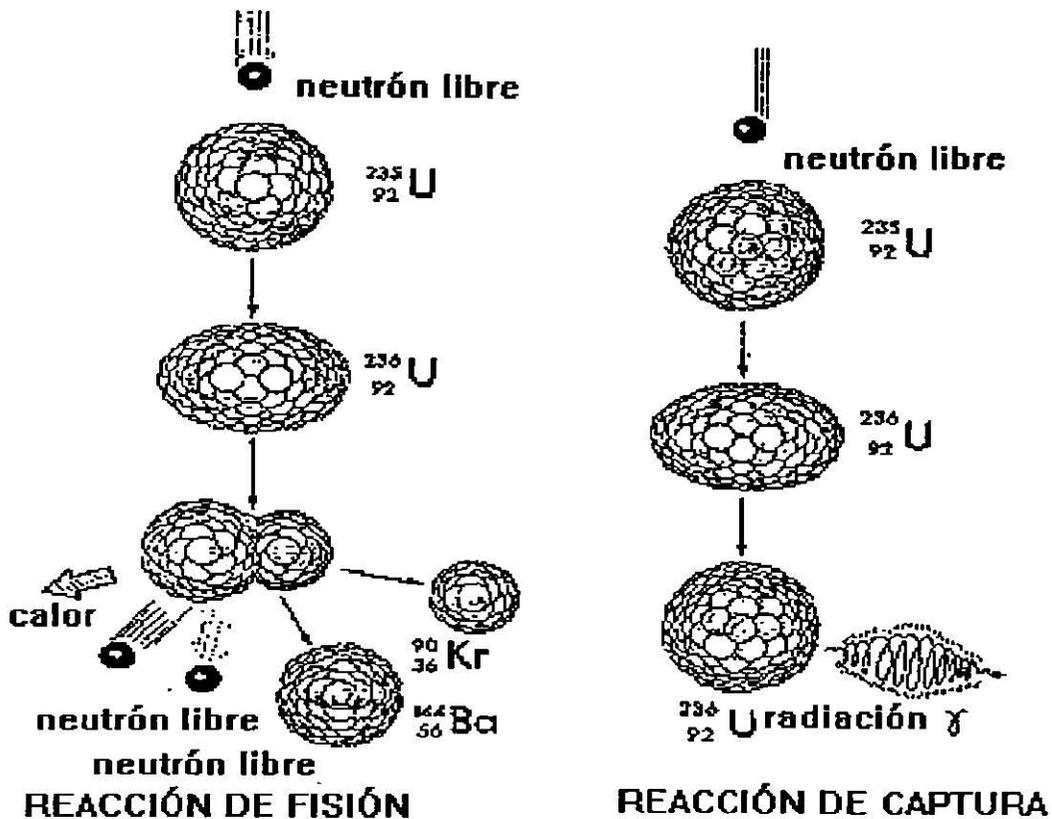


## REACCIÓN DE CAPTURA DEL URANIO 235

La reacción de captura del Uranio 235 se lleva a cabo al hacer chocar un neutrón, animado a gran velocidad con el núcleo, no se produce una fisión de dicho núcleo. El neutrón queda absorbido en el núcleo, es decir, capturado. Se obtiene así un isótopo del Uranio con el mismo número de cargas positivas (92), pero aumentado el número total de partículas nucleares, en suma hemos obtenido el Uranio 236. En todas las reacciones de captura hay emisión de radiaciones y que son ondas electromagnéticas que vibran eléctrica y magnéticamente en sentido perpendicular al avance, o sea que mientras se adelantan, se contraen y expanden hacia los lados. Su velocidad es de 300,000 Km/seg y su longitud de onda es pequeñísima, del orden de la unidad X (X es una millonésima parte de un milímetro). No tiene masa, ni carga, son muy penetrantes y su emisión puede perjudicar la salud de los seres humanos. Las reacciones de captura tienen importancia en la técnica de los reactores nucleares porque un material no fisionable, y por tanto no apto para producir energía calorífica puede transformarse en otro material fisionable. Por ejemplo, la reacción de captura del Uranio 238:



El material Uranio 238 se convierte en material inestable Uranio 239, que a su vez se convierte en Plutonio 239 que ya es material fisionable.



## CAMBIO RADIOACTIVO

Muchos de los cuerpos simples cuyo núcleo consta de gran número de partículas, son inestables, es decir que tienden a descomponerse a sí mismos en cuerpos simples más sencillos. Al descomponerse, estos cuerpos emiten partículas a grandes velocidades y muy penetrantes. Esta propiedad que presentan algunos cuerpos simples se denomina Radioactividad y los materiales que se descomponen se llaman cuerpos radioactivos. Es muy sencillo comprender que el Uranio 238 es más radioactivo que el Helio, cuyo núcleo tiene tres partículas, es decir, que cuando más complicada es la estructura nuclear, el cuerpo es más radiactivo. La sustitución de un cuerpo por otro cuya estructura sea más sencilla se denomina cambio radiactivo. En estos cambios tiene mucha importancia la naturaleza de las partículas emitidas pues si se conocen sus características, se puede proveer cuales serán los cuerpos

resultantes de dichos cambios. Se ha comprobado que entre las partículas procedentes de este tipo de cambios no existe jamás ni protones, ni neutrones sueltos, de lo que se deduce que el átomo no puede dejar salir partículas emitidas por los cuerpos radioactivos son solamente de dos tipos:

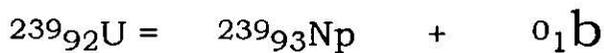
Partícula Constituidos por dos protones y dos neutrones, debido a la presencia de los protones, estas partículas son positivas y se pueden representar:



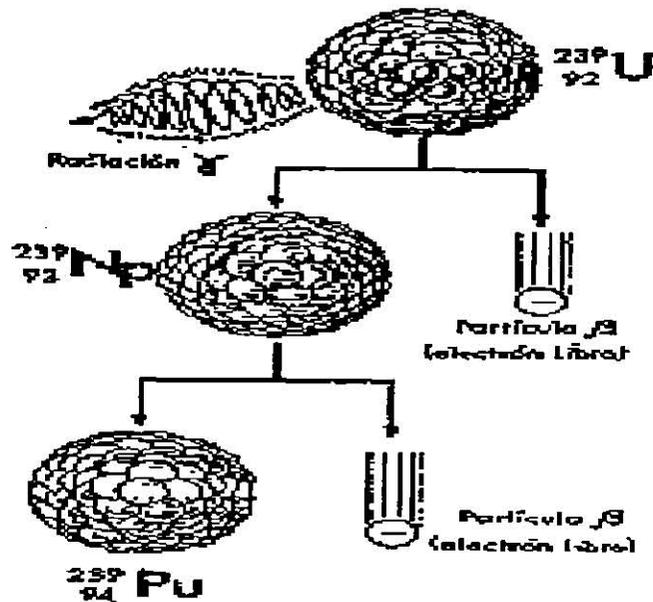
Partículas Constituidas por un electrón , tiene una carga negativa y no tienen masa. Se representan así:



Lo más característico es que provienen del mismo núcleo donde un neutrón se subdivide en un protón positivo y un electrón negativo; éste último se retira del átomo mientras que el protón permanece en el núcleo: el efecto es aumentar en una carga positiva la estructura nuclear del cuerpo. Por ejemplo el Uranio 239:



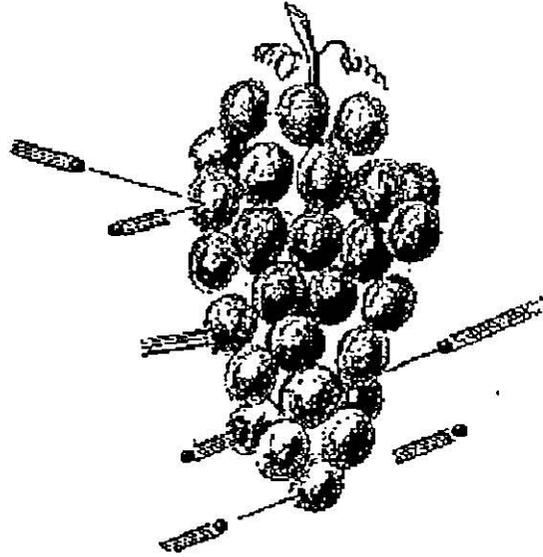
## CAMBIO RADIOACTIVO



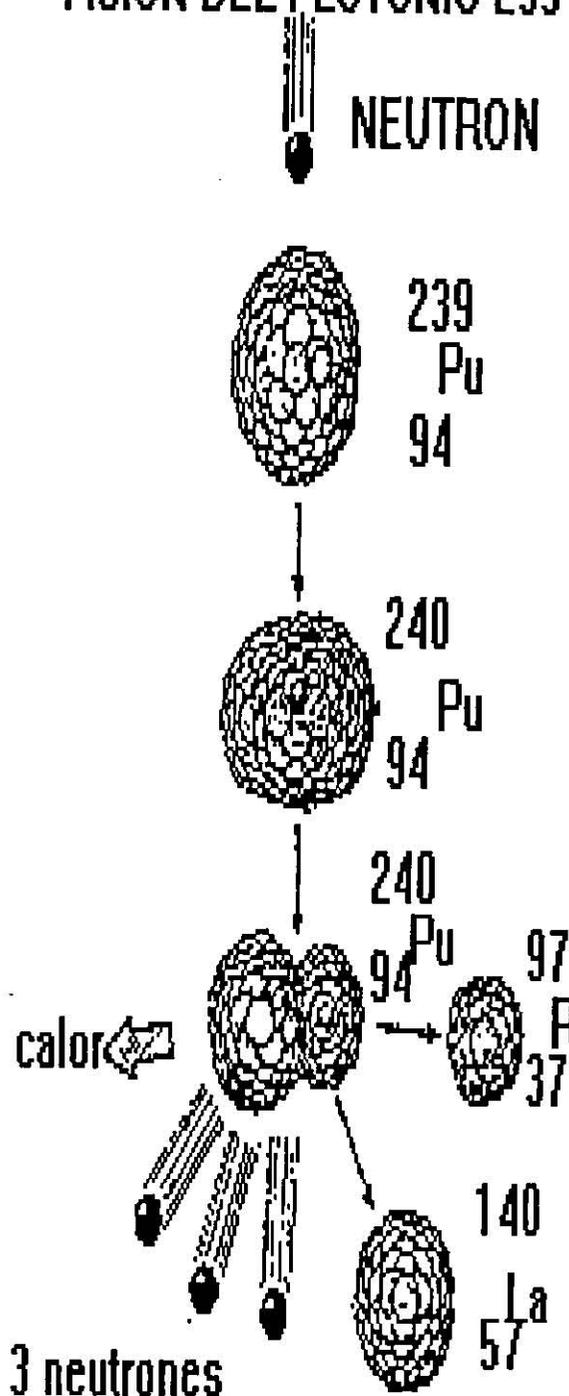
## **FISIÓN NUCLEAR**

Sabemos que el núcleo atómico es esencialmente positivo puesto que los protones existentes en el mismo están compensados por los electrones periféricos. Los electrones libres son rechazados por los electrones periféricos, que tienen su misma carga y su misma masa, que es insignificativa respecto a la masa nuclear y su efecto por lo tanto es prácticamente nulo. Los protones libres por tener la misma carga que los protones del núcleo son repelidos de éste sin llegar a chocar. Los neutrones libres, por no tener carga eléctrica, pueden chocar con los núcleos sin ser repelidos por las cargas positivas y el choque puede tener consecuencias puesto que la masa del neutrón ya es una fracción respetable de la masa nuclear. La fisión nuclear solamente es posible por la intervención de neutrones. A la cantidad de masa que se necesita para que pueda iniciarse el proceso de fisión, se denomina masa crítica. El valor de la masa crítica es distinto para los diferentes cuerpos simples, por ejemplo, para el Uranio 235, empleado en los reactores nucleares, es de unos 15 Kg. Los neutrones libres deberán desplazarse a una velocidad determinada para que se realice la fisión de los núcleos; neutrones demasiados lentos o demasiado rápidos no pueden romper los núcleos atómicos. Este valor de la velocidad de los neutrones se denomina velocidad de resonancia.

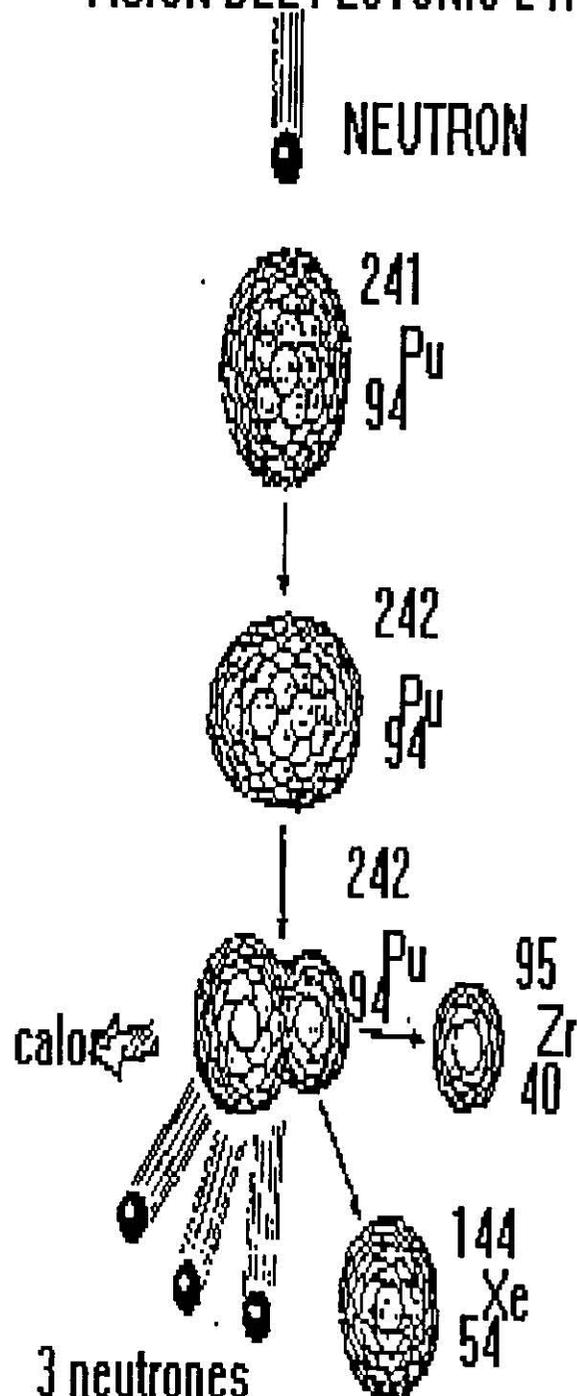
## **EJEMPLO COMPARATIVO DE FISIÓN NUCLEAR**



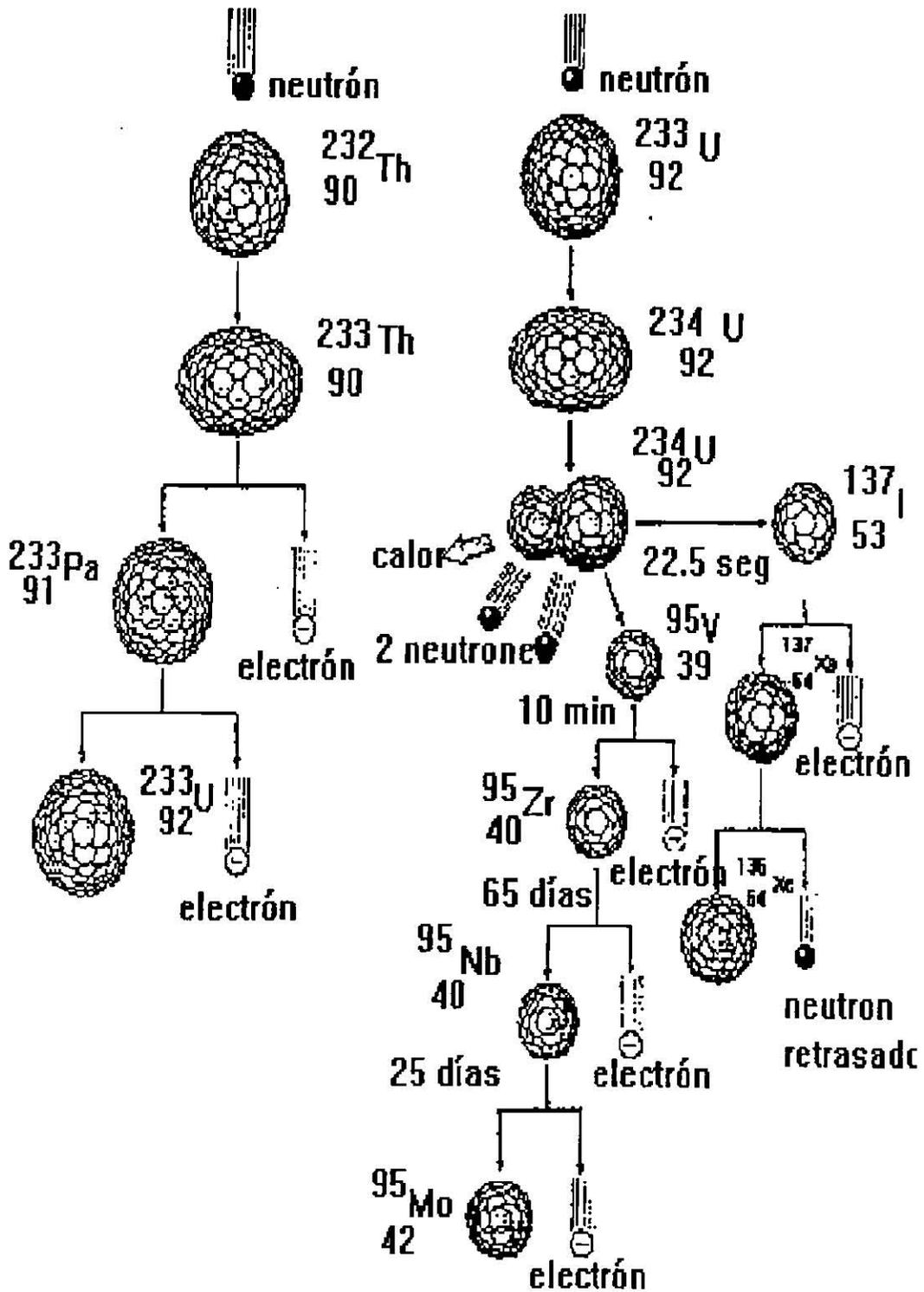
# FISIÓN DEL PLUTONIO 239



# FISIÓN DEL PLUTONIO 241



# FISIÓN DE URANIO 233



## **REACCIÓN EN CADENA**

Después de la primera fisión de un núcleo atómico quedan libres uno, dos, tres o más neutrones que pueden emplearse a su vez para provocar nuevas fisiones. El efecto es multiplicativo de tal manera que con un sólo neutrón inicial, pueden fisionarse una cantidad bastante elevada de material fisionable en muy poco tiempo. De esta forma hemos obtenido una reacción en cadena. La pequeña cantidad de un neutrón, transmite por choque al primer núcleo de infinitesimal energía cinética que lleva consigo, y estos pequeños efectos pueden provocar en millonésima de segundo la descomposición de varios Kilos de Uranio y la liberación de una cantidad enorme de energía calorífica (25 Millones de KW-hr por cada kilogramo de Uranio 235). Para que se produzca una reacción en cadena es necesario:

- \*\*Que la masa de material fisionable sea superior a la crítica.
- \*\*Que los neutrones tengan la velocidad de resonancia.

Ahora bien, los neutrones libres procedentes de las fisiones nucleares, están animados de velocidades muy superiores a las de resonancia, unos 20,000 Km/seg. Y, por lo tanto, no son aptos para provocar nuevas fisiones nucleares. Hay que frenar, moderar la velocidad de estos neutrones hasta llevarlos a la velocidad de resonancia; para ello se utilizan los moderadores. Cuando un neutrón choca con partículas del moderador no provoca la escisión de las mismas, por tratarse siempre de sustancias cuyos núcleos poseen pocas partículas y muy difíciles de romper; pero en el choque las moléculas del moderador absorben parte de la energía cinética del neutrón y éste sale rebotado, pero a la velocidad inferior a la inicial. Como moderadores se utiliza el grafito, el berilio, el agua pesada y el Helio.

## **MATERIALES EMPLEADOS EN LOS REACTORES**

Los materiales que se utilizan en los reactores son:

1.-Materiales fisionables.- Realizan la misma misión que los combustibles en las centrales térmicas convencionales constituyen por lo tanto, la materia prima en la que por fisión de sus núcleos se desarrolla la energía calorífica necesaria. Los materiales fisionables empleados en las centrales nucleares son: Uranio 233, Uranio 235 y el Plutonio 239.

2.-Materiales reproductores o de recría .- Se trata de materiales no directamente fisionables o poco fisionables, en los que por procedimientos adecuados se consiguen materiales fisionables. Los más importantes son: Uranio 238 y el Torio 232.

3.-Materiales moderadores.- Utilizados para frenar la velocidad de los neutrones procedentes de la escisión de los núcleos atómicos, hasta llevarlos a la velocidad de la resonancia, los más importantes son: el Grafito y el Agua Pesada.

4.-Materiales absorbentes o reguladores.- Destinados a restringir las reacciones nucleares en cadena producidas en los reactores hasta límites en los que sea posible el aprovechamiento industrial. Los más usados son el Boro y el Cadmio.

5.-Materiales protectores o de apantallamiento.- Destinados a proteger al personal contra las radiaciones nocivas; se utilizan para ello el Plomo y Hormigones especiales.

6.-Materiales reflectores.- Reflejan los neutrones con tendencia a escapar y que chocan con ellos obligándolos a volver hacia el núcleo del material fisionables, el más importante es el Circonio.

7.-Materiales refrigerantes.- Encargados de transportar la energía calorífica producida en los reactores nucleares hasta los cambiadores de calor y evitan el sobrecalentamiento excesivo en el núcleo del reactor. Algunos son: Agua, Cialio, Sodio, Anhídrido carbónico a presión, Helio a presión.

8.-Materiales de construcción.- Utilizados en la construcción exterior del núcleo del reactor, cambiadores de calor, cubiertas protectoras de las varillas del combustible, etc. Estos materiales son muy variados y se extienden desde aleaciones ligeras a base de aluminio y de magnesio, hasta los metales especiales para resistir altas temperaturas y altas

presiones y constituidos por acero de titanio, aleaciones de níquel, de berilio, de niobio.

9.-Productos de escisión (subproductos atómicos).- Son de modo de escorias resultantes de la escisión de los materiales fusionables, parte de estos subproductos pueden regenerarse y convertirse nuevamente en materiales fusionables, otra parte, debe retirarse periódicamente del reactor, pues constituyen venenos atómicos, muy absorbentes de electrones que pueden llegar hasta para la reacción en cadena. Entre los subproductos atómicos pueden citarse el estroncio, carbono 14, yodo 131, xenón, bario, samario, boro, hafnio, etc. los primeros tres son sustancias muy radioactivas y los últimos son venenos atómicos activadísimo.

## **REACTORES NUCLEARES**

Para clasificar todos los tipos de reactores nucleares se toma como criterio de clasificación lo siguiente:

- 1-Por el tipo de combustible( Uranio 233, Plutonio).
- 2-Por el material fértil utilizado (Torio, Uranio 238).
- 3-Por el refrigerante (Agua, Agua pesada, Metalíquido).
- 4-Por el moderador (agua, Grafito, Agua pesada).
- 5-Por la naturaleza del combustible (Homogéneo o Heterogéneo).
- 6-Por la energía de los neutrones (Reactores lentos o Rápidos).
- 7-Por la finalidad (Reactores simples o Reproductores).

El conjunto de todos los criterios a seguir para una clasificación de los reactores nucleares queda expresado en la siguiente tabla:

Combustible: Uranio 233- Uranio 235 - Plutonio 239

Material fértil : Torio 232 - Uranio 238

Refrigerante : Anhídrido carbónico - Helio -Agua -Agua pesada - Bencian difenilo - Sodio - Potasio - Aleación sodio potasio - Aleación plomo bismuto - Litio - Galio.

Moderador : Agua - Agua pesada - grafito - Berilio

Naturaleza del combustible : Homogéneos - Heterogéneos.

Energía de los neutrones : Lentos - Rápidos.

Finalidad : Simples - Convertidores - Productores.

## **PROTECCIÓN RADIOLÓGICA**

Anteriormente explicamos la forma como la radiación interactúa con la materia y los efectos que le causa. La radiación interacciona con el cuerpo humano ionizando los tejidos, esto provoca cambios químicos que podrían dañarlos.

Tengamos presente que durante toda la vida hemos estado expuestos a radiación natural : tal como los rayos solares y materiales radioactivos presentes en la naturaleza, y a la radiación artificial como los rayos X; Habrá usted notado que su exposición a estos niveles de radiación no le han ocasionado ningún daño ; incluso llega a ser benéfica. Sin embargo en una Central Nuclear los niveles de radiación a que puede ser expuesto el personal son mayores y podrían llegar a ser nocivos. Por esto el objetivo de la Protección Radiológica es mantener en su nivel mínimo la exposición a la radiación.

### **MODOS DE PROTECCIÓN**

Hay tres maneras básicas para lograr el objetivo : tiempo, distancia y blindaje, fácilmente entendibles si se tiene en cuenta los siguiente. " Si queremos mantener baja la exposición a la radiación , debemos alejarnos de la fuente. Si no podemos alejarnos de ella debemos estar expuestos al menor riesgo.

### **PROPAGACIÓN**

Como la superficie varía proporcionalmente a  $r^2$  , el número de fotones por unidad de área variará en forma inversa. Por esto, si la distancia fuente detector es suficientemente grande de manera que la fuente pueda considerarse puntual, la intensidad de radiación obedece a la " Ley del inverso del cuadrado de la distancia" como lo indica la siguiente expresión.

$$1) \quad I_2 = I_1 ( d_1/d_2 )^2$$

Para una Fuente Plana la intensidad de radiación varía inversamente proporcional con la distancia como observamos de la siguiente ecuación:

$$2) \quad I_2 = I_1 (d_1/d_2)$$

## ***Tiempo***

Cuando el trabajo debe realizarse en un lugar donde hay radiación y no podemos emplear la distancia como modo de protección; deberemos entonces recurrir al tiempo. Hay que tener presente que debemos estar expuestos a la radiación el menor tiempo posible, con el fin de evitar posibles daños.

## ***Blindaje***

Cuando no podemos usar la distancia ni el tiempo ponemos un blindaje entre la fuente de radiación y nosotros.

El tipo y la cantidad de blindaje a usar depende de factores como el tipo de radiación, la accesibilidad que deba tener el personal al área, la cantidad y costo del material, su instalación, etc.

En una central nuclear todas las áreas están provistas de un blindaje biológico, entendiendo por blindaje biológico aquel que es capaz de proteger al ser humano contra la radiación.

## ***Blindaje para Alfas***

En una central nucleoelectrica la radiación alfa no representa problema serio ya que es fácilmente absorbida y una hoja de papel es suficiente para detener a la más energética, que tiene un rango promedio de 30 cm en el aire. Por otra parte el único emisor alfa que podría tener gran contribución a una posible exposición, es el combustible pero de hecho no es así por dos razones:

a) Primero , porque su constante de decaimiento es muy baja lo que indica que emite muy pocas alfas.

b) Segundo, porque el combustible se encuentra contenido en una envoltura o encamisado que detiene las alfas emitidas por el combustible.

En caso de posible fractura del encamisado y los emisores alfa llegara a atravesar el encamisado el agua, usada como refrigerante , las puede arrastrar teniéndose entonces una fuente potencial de exposición a alfas en los lugares donde haya fugas de refrigerantes.

## ***Blindaje para Betas***

La radiación beta es de mayor preocupación que la alfa , porque es de mayor penetración que ella, aunque hay que decir que el poder de la penetración de cada partícula beta especifica depende de su energía: En la tabla 2 encontramos los rangos en aire seco para partículas beta de diferentes energías.

<u>ENERGÍA (MeV)</u>	<u>RANGO MÁXIMO EN AIRE (MTS.)</u>
0.01	0.0022
0.05	0.037
0.1	0.11
0.5	1.5
1	3.7
2	8.4
3	13

Cuando una partícula beta se va frenando pierde energía mediante la emisión de radiación electromagnética , este fenómeno conocido como bremsstrahlung debe tenerse en cuenta en el cálculo de blindaje para betas.

En una Central Nuclear estas no son tampoco de gran problema puesto que el blindaje que ha sido diseñado par radiación gamma, necesariamente absorbe la beta y el bremsstrahlung asociado.

### ***Blindaje para Gammas***

La radiación gamma es la mas penetrante y requiere como blindaje únicamente la masa, por lo tanto los materiales mientras mas densos sean darán un mejor blindaje. Plomo, Oro, Uranio son los buenos blindajes para gammas y, aunque son relativamente caros,, en algunas aplicaciones especiales uno de ellos puede ser el más apropiado. Un ejemplo sería un contenedor de plomo para muestras radioactivas.

La radiación gamma se atenúa exponencialmente al pasar a través del blindaje. La intensidad de radiación que emerge del blindaje está dada por:

$$3) \quad I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$

donde:

$I_0$ , es la intensidad de la radiación incidente al blindaje.

$I(x)$  es la intensidad después de cierto espesor de blindaje

$x$  es el espesor del blindaje (cm)

$m$  es el coeficiente de atenuación lineal (cm<sup>-1</sup>)

Definimos el coeficiente de atenuación lineal como la probabilidad de interacción, por centímetro de trayectoria, del rayo gamma por cualquiera de las formas ya conocidas (efecto fotoeléctrico, Efecto Compton y Producción de pares). El coeficiente de atenuación lineal depende de la energía y es característica de cada material, sus unidades son 1/longitud. Las figuras 1 y 2 muestran la variación de  $m$  con la energía de los rayos gamma para el concreto y el agua. Como podemos observar, en ellas, a bajas energías  $m$  es grande lo que implica que se requiere poco espesor para detener la radiación mientras que a altas energías su valor es pequeño lo que implica un espesor grande para frenar la radiación gamma.

Introduciremos ahora un término de uso frecuente en el cálculo de blindaje, el espesor hemirreductor ( $X_{1/2}$ ), al que definiremos como el espesor necesario para producir la intensidad de la radiación a la mitad. Aplicando esta definición en la ecuación 4 el espesor hemirreductor queda en función de  $m$ , como indica la expresión 4

$$x_{1/2} = 0.693 / m$$

La figura 5.3 muestra espesores hemirreductores para distintos materiales en función de la energía de los rayos gamma.

### ***Blindaje para Neutrones***

Otra radiación que es importante desde el punto de vista de blindaje en una central nuclear son los neutrones.

El material que se use como blindaje para neutrones debe tener una gran sección eficaz. Para el caso de un reactor nuclear el material que se use como blindaje para neutrones deberá cumplir tres funciones:

- a) Frenar (Moderar) los neutrones hasta llegar a la energía térmica.
- b) Reflejarlos.
- c) Absorber la radiación secundaria constituida casi toda, por radiación gamma.

Para moderar los neutrones de forma efectiva se requiere de un material compuesto de átomos ligeros. Entre los mejores están el hidrógeno y materiales que lo contienen en alto porcentaje tales como el agua, la parafina y otros hidrocarburos, el concreto, etc. El agua se usa como moderador de neutrones en los reactores nucleares LWR porque además de cumplir las funciones requeridas actúa como refrigerante.

El agua se usa además cuando se requiere tener visibilidad, particularmente para el manejo de combustible y durante su almacenamiento en donde actúa como refrigerante del combustible usado. Otro material de gran uso como blindaje es el concreto, aunque tiene la desventaja de que el acero de refuerzo puede ser una "ventana" por la que pasen neutrones, lo que disminuye su eficiencia como blindaje, con respecto al agua,

### ***DOSIS Y RAPIDEZ DE DOSIS***

Así como el calor y la luz transfieren energía, la radiación nuclear transfiere energía de la fuente al medio que se expone a ella. De aquí podemos definir la dosis como : una cantidad de radiación o la energía asociada a ella por unidad de masa. En protección radiológica se manejan 3 tipos de dosis : de exposición, de absorción y biológica, definiremos rapidez de dosis como la dosis por unidad de tiempo.

5) 
$$\text{RAPIDEZ DE DOSIS} = \text{DOSIS} / \text{TIEMPO}$$

### ***Dosis de Exposición***

Es a cantidad de energía que la radiación electromagnética deposita en aire. La unidad para medir esta dosis es el Roentgen, denotado por R. Definimos un Roentgen como la cantidad de radiación gamma que en 1 cm.<sup>3</sup> de aire seco a condiciones normales produce una cantidad electrostática de carga. Para producir una R se requieren  $2.083 \times 10^9$  pares iónicos y como en condiciones normales la densidad

del aire seco es  $1.227 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$  y teniendo en cuenta que para producir un par iónico se requieren, en promedio, 32 eV. Obtenemos.

$$1R = \frac{2.083 \times 10^9 \frac{\text{iones}}{\text{cm}^3}}{1.27 \times 10^{-3} \frac{\text{gm}}{\text{cm}^3}} \times \frac{32 \text{eV}}{1 \text{ion}} = 5.432 \times 10^{13} \frac{\text{eV}}{\text{gm}}$$

$\times 10^{-6} \text{ erg.}$

y como  $1 \text{ MeV} = 1.602$

$$R = 87.02 \text{ erg/gr de aire}$$

Esto quiere decir que Roentgen deposita 87 ergs en cada gramo de aire.

Las unidades de rapidez de dosis de exposición son Roentgen/hora (R/h) o submúltiplos de ella como mR/h (miliRoentgen/h) que son las unidades que generalmente usamos.

La rapidez de dosis de exposición la encontramos a partir de la velocidad con que la radiación gamma deposita su energía por unidad de masa, que está dado por:

$$6) \quad I = 6.63 \times 10^{-5} f E (m/r) = R/h$$

donde:

I es la rapidez de exposición (R)  
h

f es el flujo de fotones (fotones/cm<sup>2</sup> seg)

m es el coeficiente de absorción lineal del aire (cm<sup>-1</sup>)

r es la densidad del aire (g/cm<sup>3</sup>)

La ecuación 6 es válida sólo para radiación monoenergética. Para el caso en que tengamos varias energías, la rapidez de exposición la obtenemos por:

$$7) \quad I = 6.63 \times 10^{-5} \sum_i f_i E_i (m/r)_i = R/h$$

**TABLA 3 RAPIDEZ DE DOSIS, MEDIDA EXPERIMENTALMENTE A TRES PIES Y UN METRO DE LA FUENTE, PARA UNA ACTIVIDAD DE UN CURIE**

<u>RADIONUCLIDO</u>	<u>3 PIES</u>	<u>1 METRO</u>
Na <sup>22</sup>	1.34	1.12
Na <sup>24</sup>	2.15	1.8
Mn <sup>52</sup>	2.14	1.79
Mn <sup>54</sup>	0.54	0.45
Fe <sup>59</sup>	0.71	0.59
Co <sup>38</sup>	0.62	0.52
Co <sup>60</sup>	1.47	1.23
Co <sup>64</sup>	0.13	0.11
Zn <sup>65</sup>	0.31	0.26
I <sup>130</sup>	1.37	1.15
I <sup>131</sup>	0.25	0.21
Cs <sup>137</sup>	0.36	0.3
Ir <sup>192</sup>	0.61	0.51
Au <sup>198</sup>	0.27	0.23
Ra <sup>126</sup>	1.005	0.84

Como 1 R es igual a 87 erg/gramo , para aire y radiación electromagnética, entonces podemos escribir la siguiente equivalencia:

$$1 \text{ R} = 0.87 \text{ rads}$$

ó

$$1 \text{ Rad} = 1.15 \text{ R}$$

es decir que debido a la exposición de 1 R obtenemos 0.87 rads en aire.

En general se puede calcular la rapidez de absorción de dosis ( D ) a partir de las ecuaciones 6 y 9 obteniendo :

$$10) \quad D = 0.87 \text{ I} \frac{(\text{u/p}) \text{ mat}}{(\text{u/p}) \text{ aire}}$$

Observe que la ecuación 10 queda en función de la rapidez de dosis de exposición: si el material en cuestión es un tejido celular humano la dosis absorbida por el tejido es característica para cada uno. La Figura 5 nos muestra la variación en la absorción de radiación para algunos tejidos en función de la energía de los rayos gamma. En ella observamos

que la grasa absorbe como máximo 100 erg/g por cada Roentgen a que se expone, esto quiere decir que para el tejido graso absorba 1 rad debemos exponerlo por lo menos a una dosis de 1 R, mientras que para obtener 1 rad en aire se requieren 1.15 R.

De la figura 5 podemos notar que en el rango de 0.2 a 20 MeV la equivalencia de 1 rad igual a 1 R es prácticamente constante para el tejido graso, mientras que el músculo y el hueso absorben en ese rango 0.90 y 0.87 rads respectivamente por cada Roentgen de exposición.

Para energías fuera de ese rango observamos que para grasa y músculo la dosis absorbida será aún menor. Pero para los huesos hay un aumento considerable a energías menores a 0.2 MeV y un ligero aumento para mayores de 10 MeV. Esto es importante, ya que los rayos gamma con energías menores a 0.2 MeV no son muy penetrantes y es difícil que lleguen a los huesos, por otro lado gammas con energías mayores a los 10 MeV son poco frecuentes, lo que quiere decir que los rayos gamma fuera del rango antes mencionado no son un riesgo para los huesos. Por lo anterior en el rango de 0.2 a 20 MeV consideraremos, conservadoramente, que 1 rad equivale a 1 Roentgen.

### ***Dosis Biológica***

Esta dosis indica el efecto de la radiación sobre los tejidos del cuerpo. El efecto biológico además de la cantidad de energía depositada en cada gramo depende de la forma en que se distribuye la radiación durante su trayectoria. Esto es, mientras más grande sea su ionización específica mayor daño causará por centímetro de trayectoria. Así para la misma dosis absorbida el daño biológico debido a las partículas alfa, que producen gran ionización, es mucho mayor que el daño producido por los rayos gamma, que producen poca ionización.

De lo anterior concluimos que la radiación de diversos tipos y energías causará diferentes efectos biológicos para la misma dosis absorbida.

Se ha encontrado, por ejemplo, que 1 rad de radiación alfa puede hacer tanto daño biológico como 20 rads de radiación gamma. Por esto se introduce un término llamado Factor de Calidad (FC), el cual nos indica el daño que cualquier tipo de radiación causa, con respecto a la gamma.

La Tabla 4 muestra los valores del factor de calidad para diferentes radiaciones, deberemos tener presente que son valores representativos ya que para cada radiación de una energía específica, corresponde un valor específico de factor de calidad.

La unidad de dosis biológica es el rem (Roentgen equivalente man) que se define como la cantidad de células destruidas por radiación gamma al depositar 100 ergs/gramo de tejido.

<u>TIPO DE RADIACIÓN</u>	<u>FACTOR DE CALIDAD</u>
Alfa	20
Beta	1
Gamma	1
Neutrones Lentos	5
Neutrones Rápidos	10
Protones	10
Núcleos Pesados	20

La dosis biológica y la dosis absorbida se relacionan por la siguiente expresión:

$$11) \quad \text{rem} = \text{rad} \times \text{F.C.}$$

La unidad de rapidez de dosis biológica es: milirem/hr (mrem/hr), rem/hr, etc.

## **CONTAMINACIÓN RADIATIVA**

La contaminación es la liberación de material radiactivo de su contenedor normal creando con ello una fuente de radiación. En una central nuclear, el material radiactivo está dentro de las barras combustibles y si el encamisado se fractura existirán fugas hacia el agua. Otra contribución de radiactividad al agua son los productos de corrosión activados, así como productos de activación del agua misma. De lo anterior tenemos que las posibles áreas de contaminación son aquellas cercanas a posibles fugas de ductos y equipos.

La contaminación radiactiva puede presentarse en forma sólida, líquida ó gaseosa. En su forma sólida pueden ser: polvos dispersos tanto en el aire, pisos o equipos, óxidos de metales activados como Fe<sup>59</sup>, Cr<sup>51</sup> o polvos de resinas de los desmineralizadores.

Como contaminantes gaseosos tenemos productos de fisión, como I<sup>131</sup>, productos de activación del agua como N<sup>16</sup>, N<sup>13</sup>, y otros. Estos últimos tienen como característica una vida media corta.

El contaminante líquido más común es el agua del reactor, la cual además porta otros contaminantes sólidos y gaseosos.

Para efectos de protección radiológica requerimos un estricto control de la contaminación, estableciendo condiciones normales de operación mediante frecuentes inspecciones , limpieza, acceso controlado, etc.

El área donde aparezca contaminación deberá aislarse. Después se determina la forma del contaminante para establecer los límites del área contaminada y evitar una posible difusión de la contaminación.

Los límites del área contaminada se indicarán con vallas y señales. Se debe establecer el procedimiento de acceso y salida de personal y equipo.

El tipo de ropa que deba de portarse para entrar a un área contaminada depende de la naturaleza y cantidad del contaminante.

Para bajos niveles de contaminación serán suficientes guantes, bata y fundas para los zapatos. Para una contaminación más grave puede incluir además overol, casco, cinta adhesiva, etc. Está última es para sellar las costuras de los overoles, los espacios entre los guantes y la ropa , bolsas, etc. Ponerse la ropa es sencillo puesto que está limpia , el problema es quitársela porque puede estar contaminada.

Decimos que existe contaminación aérea cuando hay en el aire gases radioactivos, sólidos activados o ambos.

Aunque estas áreas son poco frecuentes para entrar en ellas además del equipo ya enunciado se debe llevar máscara con filtro cuando la contaminación se trate de partículas sólidas, o sistema de respiración artificial cuando se trate de gases radioactivos.

Se llama descontaminación al proceso mediante el cual removemos la contaminación del lugar en que aparece hacia sitios donde se le da el tratamiento adecuado. La sólida se elimina con lavado y cepillado; en caso de herramientas pequeñas se usa limpieza ultrasónica. La líquida generalmente se elimina mediante diluciones y posterior lavado y cepillado del área contaminada.

Para la contaminación aérea se puede proceder de dos maneras: ventilarse a un lugar donde nadie esté expuesto y de allí a un sistema de tratamiento de gases, ó esperar a que decaiga a un nivel por debajo de los límites permisibles, según se muestra en la siguiente tabla:

<b>RADIOISOTOPO</b>	<b><math>\mu\text{Ci}/\text{cm}^3</math> DE AIRE</b>
$\text{U}^{238}$	$7.0 \times 10^{-11}$
$\text{Sr}^{90}$	$1.0 \times 10^{-9}$
$\text{Na}^{24}$	$1.0 \times 10^{-7}$
$\text{Xe}^{133}$	$1.0 \times 10^{-5}$
$\text{I}^{131}$	$97.0 \times 10^{-9}$

### ***Contaminación Externa e Interna***

En un área contaminada existe el riesgo de contaminación externa e interna. La contaminación externa es la menos peligrosa ya que el cuerpo posee barreras naturales como la piel y los músculos.

El verdadero riesgo es la contaminación interna ya que una vez que ha entrado un emisor de radiación actúa directamente sobre los órganos internos y no hay manera de sacarlos: las vías por las que un emisor de radiación puede entrar al cuerpo son:

- a) Inhalación directa
- b) Ingestión por vía oral
- c) A través de la piel o de una herida

Algunos contaminantes se distribuyen en todo el cuerpo, sin embargo la mayoría se concentra en un órgano particular que siente preferencia por ellos. El órgano en que se deposita un núclido. En la tabla 6 se enuncian algunos núclidos y sus órganos críticos.

### ***Vida Media Efectiva***

La dosis que recibe un órgano es proporcional a la cantidad de contaminante en él. Su disminución depende del decaimiento radiactivo del núclido y de la capacidad biológica del órgano para desecharlo. A partir de ésta definimos una constante de decaimiento biológico  $\lambda_b$ , que es la probabilidad de que el cuerpo elimine el radionúclido por unidad de tiempo.

Ahora podemos hablar de vida media efectiva  $T_{1/2 \text{ eff}}$  como el tiempo necesario para eliminar a la mitad la actividad del radioisótopo ingerido por procesos biológicos y por decaimiento radiactivo.

$$12) \quad T_{1/2 \text{ eff}} = \frac{0.693}{\lambda_b + \lambda}$$

La ecuación 5.12 puede también escribirse como:

$$12) \quad T_{1/2 \text{ eff}} = \frac{T_b T_{1/2}}{T_b + T_{1/2}}$$

donde:

$T_b$  es la vida biológica

$T_{1/2}$  es la vida media radiactiva

En la tabla 6 se muestran valores de vida media efectiva.

<b>TABLA 6. ORGANOS CRITICOS Y VIDA MEDIA EFECTIVA PARA ALGUNOS NUCLIDOS</b>				
<b>ORGANO CRÍTICO</b>	<b>NUCLIDO</b>	<b>RADIATIVA</b>	<b>VIDA MEDIA</b>	
			<b>BIOLOGICA</b>	<b>EFECTIVA</b>
Cuerpo Entero	$H^3$	12.26 a	12.0 d	12.0 d
Huesos	$Sr^{90}$	30.13 a	33.62 a	16.32 a
Huesos	$Pu^{239}$	24400.0 a	200.0 a	200 a
Huesos	$U^{235}$	$7.12 \times 10^8$	300 d	300 d
Tiroides	$I^{131}$	8.05 d	138 d	7.6 d

## **CLASIFICACIÓN DE LAS ÁREAS EN UNA CENTRAL NUCLEAR**

Para evitar problemas de contaminación y sobreexplotación a la radiación, una Central Nuclear se Divide en dos tipos de áreas: No restringidas y restringidas.

En un área no restringida existe un nivel tan bajo de radiación que cualquier persona que se encuentre en ella no recibirá más de 0.5 rem en un año.

Un área restringida es aquella a la que se tiene acceso controlado y puede ser de cuatro clases.

a) Área de materiales radiactivos.- Es un área en la cual se usan o almacenan materiales radiactivos en una cantidad 10 veces mayor que la especificada en la tabla 7 o 100 veces mayor que la especificada si se trata de Uranio o Torio.

**TABLA 7. CANTIDADES PERMISIBLES DE ACTIVIDAD PARA  
ALGUNOS RADIONUCLIDOS (TOMADAS DEL 10 CFR 20)**

<b>MATERIAL</b>	<b>ACTIVIDAD (<math>\mu</math>Ci)</b>
I <sup>131</sup>	1
Pu <sup>239</sup>	0.01
Ra <sup>226</sup>	0.01
Sr <sup>90</sup>	0.1
Th natural	100
U natural	100
U <sup>233</sup>	0.01
U <sup>235</sup>	0.01
Xe <sup>135</sup>	100

b) Área de alta radiación: es un área en la que se puede recibir una dosis de 100 mRem en una hora. Si el área de alta radiación se prolonga durante más de 30 días deberá equiparse con alarmas visibles y audibles tanto locales como remotas.

c) Área de radiación: es un área en la que por el nivel de radiación existente se puede recibir una dosis mayor a 5 mRem en una hora.

d) Área de contaminación aérea.- Es cualquier área accesible al personal en la que existe una concentración de contaminación en el aire que exceda las concentraciones permisibles en el aire que se muestran en la Tabla 5. Las áreas de este tipo son poco frecuentes y de poca duración.

En la entrada de las áreas restringidas deben colocarse avisos que indiquen el tipo de área, como los que se muestran en la figura 6. A fin de evitar riesgos innecesarios deben cumplirse estrictamente las normas y observaciones establecidas para cada área.

## ***NORMAS REGULADORAS***

La interacción de la radiación con el cuerpo humano ya sea de fuentes externas o contaminación interna conduce a efectos biológicos que pueden aparecer como síntomas clínicos. La naturaleza y severidad de estos síntomas dependen de la dosis, rapidez de dosis y parte del cuerpo irradiado.

Los daños por radiación se dividen en dos clases: efectos somáticos, que aparecen en la misma persona irradiada y efectos genéticos que aparecen en la descendencia de la persona irradiada por daños causados en las células germinales. Por lo anterior se deberá contar con un control estricto de las dosis recibidas por el personal en las diferentes áreas de la central. Las normas reguladoras indican las dosis permisibles que podemos recibir en el ejercicio diario de nuestras labores.

Dosis permisible acumulada es la dosis que como máximo podemos recibir hasta la edad presente y la podemos calcular a partir de:

$$13) \quad \text{DPA} = 5 ( N - 18)$$

donde:

DPA es la dosis permisible acumulada, en rem. N es la edad del individuo en años.

Esta ecuación nos dice la dosis que podemos recibir a lo largo de nuestra vida y como se verá no es válida para personas menores de 18 años. Aunque la ecuación se aplica a cuerpo entero, está basada en las gónadas que son de los órganos más sensibles a la radiación.

La dosis total recibida debe ser menor que la DPA.

Las normas nos permiten recibir por cada año hasta 5 rem. En condiciones especiales se pueden recibir hasta 12 rem por año ( 3 rem por bimestre) , a condición de no rebasar la DPA. Ilustramos esto con un ejemplo: Una persona que al entrar a trabajar a una central nuclear cuenta con 25 años ¿ durante cuántos años podrá recibir 12 rem?.

De nuestra expresión de DPA tenemos:

$$DPA = 5 ( 25-18) = 35 \text{ rem.}$$

Esto es, dispone de 35 rem. Como recibe 12 rem/año y acumula 5 por cada año que transcurre después de que inicia su trabajo podemos hacer la siguiente tabla.

<b>TABLA 8. ESTADÍSTICAS DE DOSIS</b>				
<b>AÑOS</b>	<b>EDAD</b>	<b>ACUMULADA</b>	<b>DOSIS</b>	
			<b>RECIBIDA</b>	<b>DISPONIBLE</b>
0	25	35	0	35
1	26	+5	-12	28
2	27	+5	-12	21
3	28	+5	-12	14
4	29	+5	-12	7
5	30	+5	-12	0

Esto quiere decir que según el criterio de la DPA sólo durante 5 años podrá recibir 12 rem/año , el sexto año sólo podrá recibir 5 rem como máximo.

La norma DPA no se aplica a las extremidades, en ellas las dosis recibidas son mayores que permisibles a cuerpo entero. Esto se debe a que las extremidades son más resistentes a la radiación puesto que sólo están compuestas de músculo y hueso , mientras que en el tronco del cuerpo están contenidos la mayor parte de los órganos vitales.

En la Tabla 9 se reportan los valores recomendados en las normas.

<b>EXPOSICIÓN</b>	<b>DOSIS (REM/AÑO)</b>
Cuerpo completo	5
Piel	30
Manos, Pies, Antebrazos y Piernas	75
Gonadas	5
Otros Órganos	15

### ***Reglamentación Interna***

Para cumplir con las normas recomendadas de Protección Radiológica debe llevarse un estricto control de la exposición a que está sujeto el personal, para asegurar que nadie se exponga de tal manera que corra riesgos innecesarios o que le impida a un operador trabajar en un área restringida cuando sea requerido.

La solución es trabajar dentro de los límites de rapidez de dosis. Para áreas de residencia continua es de 2.5 mrem/hr, que considerando 8 horas diarias de labor, durante 5 días a la semana implican 20 mrem/día y 100 mrem/semana. Trabajando dentro de la norma de la DPA, tendremos un promedio de 2.5 mrem/hr durante toda la vida.

### ***DOSIS AGUDAS***

Una dosis aguda es una gran dosis de radiación recibida en un pequeño período de tiempo. Este tipo de dosis puede recibirse en casos de accidente. La información que de estos casos se tiene es muy limitada, pero se tiene conocimiento de personas que han recibido 100 rem/día sin haber experimentado ningún cambio biológico, lo que confirma lo que ya antes habíamos dicho: que los efectos que pudieran presentarse dependen de la persona irradiada. En la Tabla 10 se reportan posibles efectos por dosis agudas.

**TABLA 10. POSIBLES EFECTOS BIOLÓGICOS EN DOSIS AGUDAS EN UNA EXPOSICIÓN A CUERPO ENTERO**

<b><u>DOSIS (rem)</u></b>	<b><u>EFECTO</u></b>
0 a 50	No hay efecto observable
50 a 100	Ligeros cambios en la sangre de los que hay rápida recuperación
100 a 200	Nauseas, fatiga, vómito, pérdida del apetito. Cambios moderados en la sangre. Recuperación en semanas.
200 a 250	Igual al anterior, mas hemorragias, infecciones, cambios severos en la sangre. Posible muerte.
500	Se presentan los efectos anteriores en un período de 2 hrs. La mitad de la víctimas pueden morir.
1000	Muere del 90% al 100% de las personas irradiadas.

