

T
CK9203
P7
MS6
c.1

T
CK9203
P7
ME6
C.1



1080086879

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

**CENTRALES
NUCLEOELECTRICAS**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

P R E S E N T A

MARIANO MUÑOZ RIOS

ASESOR: ING. VICENTE CANTU GUTIERREZ

SAN NICOLAS DE LOS GARZA N.L.

AGOSTO DE 1995

T
TK9203
.P7
M96



**CENTRALES
NUCLEOELECTRICAS**

INTRODUCCIÓN

La humanidad ha sentido, a través de la historia una gran fascinación por el estudio de la naturaleza, de su mundo y de su lugar en este, encontrando como medio para lograrlo dos grandes ramas, la química y la física.

La Física y la Química ocupan lugares vecinos, pero entre ambas ramas existe una diferencia bien marcada en su manera de reaccionar frente a los fenómenos naturales.

La química es el estudio racional y empírico de la estructura de la materia y de los cambios que en ella ocurren durante los procesos naturales y los experimentos provocados. Desde el punto de vista de interés la definimos como la forma en que los átomos se combinan.

Y la física es la ciencia que estudia las propiedades de los cuerpos y las leyes que tienden a modificar su estado o su movimiento sin cambiar su naturaleza. Para nuestro caso la definimos como el estudio de los eventos que suceden en el núcleo del átomo.

PROPIEDADES QUÍMICAS

Son aquellas que están íntimamente ligadas a la composición interna de la sustancia y se observan cuando sufren cambios en su composición.

Los cambios químicos son cualquier transformación que implique un cambio en la composición definida va acompañado de la formación o rompimiento de los enlaces químicos.

PROPIEDADES FÍSICAS

Son aquellas que no guardan relación con la composición interna de la sustancia.

Un cambio físico de una sustancia no implica variaciones en las propiedades específicas o la composición.

Tanto en el cambio químico como en el físico ocurren transformaciones energéticas.

ESTRUCTURA ATÓMICA

Desde la antigüedad el hombre ha deseado conocer más acerca del mundo en que vive. Una de sus preocupaciones fue saber de que estaba hecha la materia de las cosas que lo rodeaban. Creyeron que entonces que la materia estaba formada por partículas diminutas e invisibles llamadas átomos, que se define como las partículas más pequeñas e indestructibles de un elemento que conservan las propiedades de dicho elemento.

COMPOSICIÓN DEL ÁTOMO

Si logramos la partición de un átomo encontraremos que esta compuesto de partículas subatómicas que son el electrón, el protón y el neutrón. En la tabla 1.1 se indican algunas de sus características. Los neutrones y los protones se encuentran formando lo que conocemos como núcleo. Los electrones se encuentran en órbitas definidas alrededor del núcleo.

TABLA 1.1

CARACTERÍSTICAS DE LAS PARTÍCULAS SUBATOMICAS

PARTÍCULA	MASA (UMA)	CARGA ELÉCTRICA
Electrón (e)	0.00054	- 1 (negativa)
Neutrón (n)	1.00866	0 (neutra)
Protón (p)	1.00759	+ 1 (positiva)

A los protones y neutrones, como constituyentes del núcleo, también les llamamos indistintamente nucleones.

SIMBOLOS

Los alquimistas medievales usaban símbolos para los elementos tales como la luna en cuarto creciente que representaba la plata. En la actualidad se usan abreviaturas para representarlos. Por ejemplo: Au para el oro, U para el uranio, B para el boro, etc. todas estas abreviaturas están representadas en la tabla periódica (figura 1.1) y la tabla 1.2

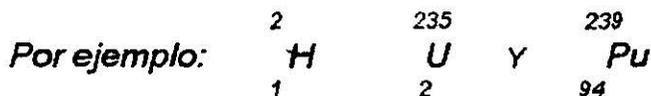
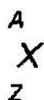
NUMERO ATÓMICO Y NUMERO DE MASA

Cada elemento tiene sus propias características atómicas y se distinguen entre si por el numero de protones y neutrones contenidos en el núcleo.

Al numero de protones que se encuentran en el núcleo del átomo se le conoce como numero atómico y se representa por la letra Z. En base a este numero se ordenan los elementos químicos en orden creciente como se encuentra en la tabla periódica (figura 1.1) y es el que señala o marca el elemento del cual se esta hablando.

A la suma de protones y neutrones se les llama numero de masa y se representa por la letra A.

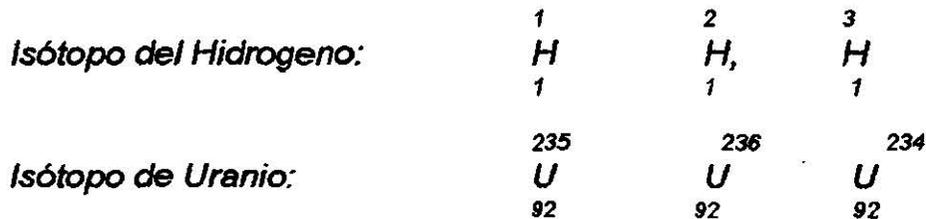
Estos numeros (Z y A) generalmente acompañan al simbolo del elemento (X) de la siguiente forma:



En donde:

1,92,94 son el número atomico

Existen núcleos que tienen el mismo numero atómico pero diferente numero de masa y se les conoce como isótopos del mismo elemento. Por ejemplo:



Se encuentran núcleos que tienen igual número de masa pero diferente número atómico y se les conoce como isobaras.

Es frecuente también que se presenten núcleos que tienen igual número de masa e igual número atómico pero con diferente nivel energético y se les conoce como isómeros.

DIMENSIONES ATÓMICAS

Los átomos son partículas muy pequeñas, la magnitud de su radio es del orden de 10^{-8} cm; para el núcleo varía de 10^{-13} cm. El tamaño exacto depende del elemento que consideraremos (figura 1.2).

PESO ATÓMICO

El peso atómico se representa en unidades de masa atómica (uma). Donde 1 uma es 1.66×10^{-24} g. En la tabla 1.2 se reportan los valores del peso atómico promedio de cada elemento. Esto se debe a que en la naturaleza los elementos se encuentran como una mezcla de isótopos en diferente porcentaje. Por ejemplo el uranio natural es una mezcla de tres isótopos.

ISÓTOPO	% ABUNDANCIA	PESO ATÓMICO
²³⁴ U	0.006	234.0409
²³⁵ U	0.72	235.0439
²³⁸ U	99.274	238.0507

Al multiplicar la proporción por su peso atómico correspondiente y sumarlos obtenemos el valor de 328.03 uma que es el peso químico elemental del uranio.

En la tabla 1.3 se reportan los pesos atómicos de los isótopos de cada elemento.

CONFIGURACION ELECTRONICA

El numero de electrones de un átomo es igual al de protones que hay en el núcleo, por lo que el átomo es eléctricamente neutro. Los electrones se encuentran alrededor del núcleo en órbitas llamadas capas, localizadas a distancias definidas del núcleo. Las capas se identifican con las letras K, L, M, N, etc. que comprenden a las capas 1, 2, 3, 4, etc. la capa K es la mas cercana al núcleo. El numero máximo de electrones que puede contener una órbita es igual a:

$$2 n^2 = \text{numero máximo de electrones}$$

donde:

n es el numero de capa

Dentro de cada capa existen subcapas identificadas con la letra *s, p, d, f, etc.*, que se llenan con 2, 6, 10, 14, etc. electrones respectivamente. En la Tabla 1.4 se muestra la configuración electrónica por capas y subcapas para todos los elementos químicos.

En la Tabla 1.4 observamos una progresión ordenada en el llenado de las capas y subcapas, hasta llegar a la subcapa "d" de la capa "M". Esta subcapa se empieza a ocupar después de la subcapa "s" de la capa "N" se ha llenado, por que a partir de esta el llenado de órbitas no sigue la secuencia establecida.

Para simplificar el numero y localización de los electrones de un átomo se usa la notación del siguiente ejemplo:



donde:

2 es el numero del nivel principal.

p es la letra del subnivel.

3 es el numero de electrones en un subnivel determinado.

REACCIONES QUÍMICAS

Una reacción química es el proceso mediante el cual los átomos de un elemento se combinan con los de otro para formar compuestos, como resultado de transferir o compartir sus electrones. En este proceso solo intervienen los electrones de la capa externa y en particular de las últimas subcapas. Los electrones implicados en una reacción química se llaman electrones de valencia de un átomo.

El número de electrones que está en la subcapa comparado con el número requerido para llenarla, nos indica como se combinan químicamente los átomos. Por ejemplo: Si queremos combinar Sodio metálico y cloro gaseoso, necesitamos ponerlos en contacto en un recipiente y administrar calor. La ecuación química para representar esto es:



Si observamos la tabla 1.4 veremos que en el renglón del sodio veremos que tiene un electrón en la subcapa 3s; esta subcapa se llena con dos electrones. Esto es muy importante ya que el cloro tiene 5 electrones en la subcapa 3p; esta subcapa se llena con 6 electrones. Por lo tanto, el sodio requiere de un electrón para llenar su subcapa, y lo mismo le sucede al cloro, en consecuencia, estos elementos son afines y pueden compartir el par de electrones, para que ambos llenen sus capas (Fig. 1.3). Al compartir sus electrones forman la sal común que conocemos.

Como se combinara un elemento al que le falta un electrón, para completar su subcapa externa como es el caso del Oxígeno? . Si vemos la configuración electrónica del Oxígeno, notamos que tiene 4 electrones en la subcapa 2p; la subcapa p se llena con 6 electrones por lo tanto le faltan 2 y si consideramos ahora el hidrogeno cuya configuración electrónica nos indica que tiene un electrón en la subcapa 1s, por lo que le falta 1 para llenarla. Estos elementos se combinan de la siguiente forma:



Esta reacción es similar al del NaCl pero ahora al oxígeno le faltan 2 electrones y el Hidrogeno solo tiene uno disponible para compartir, entonces el Oxígeno compartirá electrones con dos átomos de Hidrogeno como se muestra en la figura 1.4.

En la Tabla 1.4 encontramos una familia de elementos cuyos miembros tienen sus subcapas externas llenas y rara vez forman compuestos, a menos que se les force a reaccionar. Estos son los llamados gases nobles: He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn.

Evidentemente los átomos de los gases nobles tienen muy poca tendencia a perder, ganar o compartir electrones con otros átomos. Para fines prácticos se consideran inertes.

Figura 1.1 Enlace del Cloruro de Sodio NaCl

Figura 1.4 Enlace del agua (H₂O)

MOLÉCULA

Una molécula está hecha por uno, dos o más átomos y es la partícula más pequeña que conserva las mismas propiedades del elemento o compuesto del cual forma parte.

PESO MOLECULAR

Es el peso molecular la masa o peso de la molécula de un elemento o compuesto y se calcula sumando los pesos atómicos de los átomos que la forman. Por ejemplo, para el agua tenemos:

$$\text{Hidrogeno} \quad 2 \times 1.008 \text{ uma} = 2.016 \text{ uma}$$

$$\text{Oxigeno} \quad 1 \times 16.00 \text{ uma} = \underline{16.00 \text{ uma}}$$
$$18.016 \text{ uma}$$

El peso molecular del agua es por lo tanto 18.016 uma.

ÁTOMO GRAMO Y MOL GRAMO

ÁTOMO GRAMO.- Es igual a la magnitud del peso atómico expresado en gramos.
Por ejemplo, un átomo gramo de uranio es igual a 18.016 g.

MOL GRAMO.- Es igual a la magnitud del peso molecular expresado en gramos;
Por ejemplo, una mol gramo de agua es igual a 18.016 g.

Esto tiene gran importancia, ya que un átomo o mol gramo sin importar su peso contiene exactamente el mismo número de átomos o moléculas. A esta cantidad la conocemos como número de Avogadro, denotado por N_A , y es igual a:

$$N_A = 6.023 \times 10^{23} \text{ átomo/átomo gramo.}$$

$$N_A = 6.023 \times 10^{23} \text{ molécula/mol gramo.}$$

Este numero es muy útil para calcular el numero de átomos o moléculas por unidad de volumen de una sustancia, llamada también densidad atómica y se hace de la sig. manera:

$$N = \frac{N_a p}{M}$$

donde:

N es el numero de átomos o moléculas por cm^3 .

N_a es el numero de Avogadro.

p es la densidad absoluta de la sustancia en gr/cm^3 .

M es el peso atómico o molecular en unidades de $\text{gr}/\text{atomo-gr}$ o $\text{gr}/\text{mol-gr}$.

ejemplo:

determinar el numero de moléculas por cm^3 . de metano (Ch_4) cuya densidad es de $7.2 \times 10^{-4} \text{ gr}/\text{cm}^3$.

$$M = 12.00 + 4 (1.008) = 16.032 \text{ gr}/\text{mol-gr}.$$

$$N = \frac{(6.023 \times 10^{23} \text{ moléculas})}{16.032 \text{ gr}/\text{mol-gr}} \cdot (7.2 \times 10^{-4} \text{ gr}/\text{cm}^3.)$$

$$N = 2.7 \times 10^{19} \text{ Moléculas}/\text{cm}^3.$$

Si desea conocer el numero de átomos o moléculas, puede hacerse por:

$$N = \frac{N_a W}{M}$$

donde:

N es el numero de átomos o moléculas.

W es el peso de la muestra en gr .

Ejemplo:

Calcular el número de átomos que hay en un gramo de cobalto.
 $M = 58.93 \text{ gr/átomos-gr}$ (tabla 1.2) y substituyendo en la ecuación.

$$N = \frac{6.023 \times 10^{23} \text{ átomos}}{58.93 \frac{\text{átomos-gr}}{\text{gr}}} (1 \text{ gr})$$

$$N = 1.02 \times 10^{22} \text{ átomos.}$$

IONIZACION

Para entender que mantiene unidos a los electrones en órbita alrededor del núcleo, debemos recordar la ley de las cargas eléctricas, que establece: *cargas iguales se repelen y cargas opuestas se atraen*. recordemos que el electrón tiene carga negativa y el núcleo carga positiva, la fuerza eléctrica de atracción entre ambas, es lo que mantiene al electrón en órbita.

Un átomo eléctricamente neutro tiene el mismo número de electrones orbitales que el número de protones en el núcleo. cuando los átomos o moléculas adquieren carga eléctrica por transferencia de electrones decimos que se ha ionizado.

La transferencia de electrones puede llevarse a cabo por varios caminos. Por ejemplo: cuando separamos los átomos que forman un compuesto como es el caso de disolver una sal en agua.



Al ionizarse la sal, los átomos no quedan eléctricamente neutros. El cloro contiene uno de los electrodos del sodio que compartían en su unión química y es por esto que adquiere una carga negativa (exceso de electrones). El sodio al faltarle electrones, adquiere carga positiva. Otra forma de ionizar a la materia es debida a la radiación nuclear, que se analizara en el capítulo sig.

Un ion con carga positiva se llama cation y uno con carga negativa se llama anion. La razón de esto es que cuando tenemos los iones en

solución y les aplicamos un voltaje por medio de un electrodo positivo (ánodo) y uno negativo (catodo), el ion cargado positivamente viajara hacia el ion cargado negativamente hacia el ánodo (+) por lo que le llamamos anion.

Los iones no necesitan ser átomos solos, sino que pueden encontrarse como una combinación de ellos; llamados radicales. Un radical es una molécula que se ha ionizado y se comporta en una reacción química como si fuera un solo átomo

Ejemplos: sulfato, carbonato, clorato, oxhidrilo.

QUIMICA DEL AGUA

El agua es el principal transportador de impurezas a los componentes de la central y la acumulación de estas impurezas en algunos de estos componentes pueden ocasionar el fenómeno de corrosión y por lo tanto la falla de los mismos lo que puede representar un para de la central.

Las reglas que deben seguirse en la operación del reactor y las cantidades máximas de impurezas permitidas en el refrigerante se encuentran señaladas en las especificaciones técnicas de operación de la central.

En el caso de los BWR (reactores de agua en ebullición) el refrigerante es agua.

En una central nuclear existen los problemas químicos del agua que se presentan en una central convencional, además los que surgen por la activación.

La activación es un proceso mediante el cual el átomo normalmente estable absorbe un neutrón transformándose en un isótopo radioactivo. Este fenómeno se lleva a cabo dentro del reactor.

La unidad usada para expresar la cantidad de Hidrogeno ionizado en el sistema es el ph y lo calculamos de la sig. ecuación:

$$pH = - \log (H^+)$$

donde:

H es la concentración en moles/lt.

por ejemplo: si la concentración de iones (H⁺) es de 10⁰, entonces el pH es cero.

Si la concentración es de 10⁻¹⁴, el pH es de 14.

Para el caso del agua pura el pH es 7 , los valores de pH menores de 7 indican que la solución es ácida, mientras que arriba indican que es básica o alcalina.

Dentro de los contaminantes que deben limitarse están : cloruros, oxhidrilo, oxígeno, boro, sílice, sólidos insolubles y la máxima cantidad de productos de corrosión activados en el refrigerantes del reactor.

- 1).- Oxhidrilo (OH⁻): PRESENTE EN CANTIDADES, TRAERÁ COMO CONSECUENCIA FALLAS EXCESIVAS EN LAS TURBINAS. (FRAGILIZACION CAUSTICA).**
- 2).- Cloruro (Cl⁻): ES UN GENERADOR DE VAPOR QUE USA ACERO SIN ESTAÑO PARA LA SUPERFICIE QUE TRANSFIERE CALOR, PUEDE CAUSAR LA RUPTURA DEL ACERO.**
- 3).- Oxígeno (O₂): INDESEABLE PORQUE CORROE RAPIDAMENTE A LOS MATERIALES DEL SISTEMA DEL REACTOR, TANTO EN GRANDES CANTIDADES COMO EN PEQUEÑAS; PRODUCE OXIDO ROJO U OXIDO DE FIERRO NEGRO RESPECTIVAMENTE QUE SE DESPRENDERÁ CAUSANDO PROBLEMAS. EN UN REACTOR QUE OPERA CON AGUA ES IMPOSIBLE REDUCIR LA CANTIDAD DE OXIGENO LIBRE A CERO, PORQUE EN EL REACTOR SE PRODUCE RADIACIÓN IONIZAN, QUE CAUSA QUE EL AGUA SE IONICE. (2H⁺ Y O⁻). EN EL BWR CUALQUIER HIDROGENO Y OXIGENO QUE SE FORMEN POR DESCOMPOSICIÓN RADIOLITICA DEL AGUA DE ENFRIAMIENTO SALEN JUNTO CON EL VAPOR A LA TURBINA, DESPUÉS AL CONDENSADOR DE DONDE SON EXTRAÍDOS POR LOS EYECTOTES DE AIRE HACIA UN SISTEMA DE TRATAMIENTOS TERMICOS.**
- 4).- BORO (B): ES LA SUBTANCIA UTILIZADA PARA EL CONTROL DEL REACTOR, CONTENIDAS EN LAS LLAMADAS BARRAS DE CONTROL, LA RUPTURA DE ALGUNA BARRA DARA LUGAR A LA LIBERACION DEL BORO. LA CONCENTRACION DE ESTE SE ESTABLECE DE TAL MANERA QUE CON DETERMINADO NUMERO DE BARRAS DANADAS SE CONTINUE LA OPERACION DEL REACTOR.**

5).- SILICE: ES TRANSPORTADO POR EL VAPOR HACIA LA TURBINA Y SE DEPOSITA EN LOS ALABES. PETURBA EL FLUJO DE VAPOR EN LA TURBINA. ESTE CONTAMINANTE NO CONSTITUYE EN GRAN PROBLEMA EN UNA CENTRAL NUCLEAR DEBIDO A LA PUREZA DEL AGUA.

6).-SOLIDOS

INSOLUBLES: INDESEABLES PORQUE SE DEPOSITAN SOBRE LAS SUPERFICIES CALIENTES, REDUCEN LA TRANSFERENCIA DE CALOR Y PRODUCEN PERDIDA DE PRESION.

El nivel de actividad en el refrigerante del reactor, es una medida de las fallas del encamisado del combustible. Se establece un limite de actividad para permitir la operación continua del reactor. La otra forma de tener actividad es debida a la activación de materiales estructurales que integren el reactor.

Podemos concluir que una alta producción de corrosión es perjudicial porque reduce la resistencia del material y produce la liberación de substancias radioactivas.

En el reactor BWR se realiza la ebullición del agua, fig. 1.5 y siendo un proceso evaporativo cualquier impureza que lleva el agua de alimentación al reactor tendera a concentrarse en el liquido de evaporación. Por eso se requiere un sistema de limpieza, constituido por desmineralizadores.

TRATAMIENTO DEL AGUA

Debido a las impurezas que arrastra el agua desde su origen hasta la central, es necesario someterla a tratamientos de purificación para eliminarlas llevándoselas a condiciones específicas de pureza.

Como hemos mencionado, nos interesa que el agua que se alimenta al reactor presente el nivel mas bajo de impurezas que sea posible.

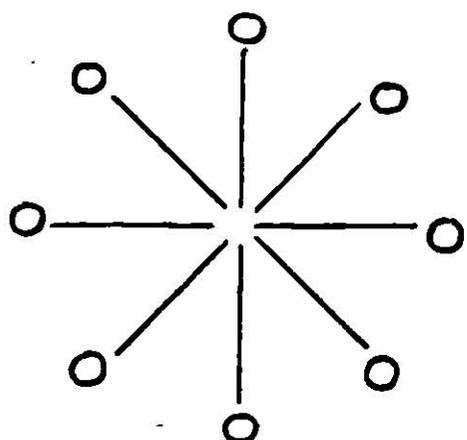
En la actualidad el método mas usado para el tratamiento de agua es el de emplear desmineralizadores.

DESMINERALIZADORES

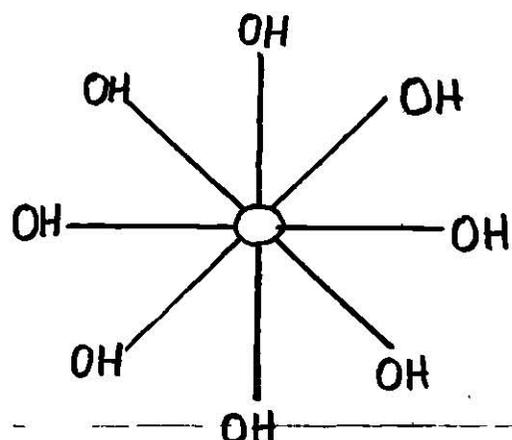
El desmineralizador es un equipo que sirve para darle un tratamiento de limpieza de agua. La limpieza consiste en eliminar impurezas iónicas solubles en el agua, por lo que también al desmineralizador suele llamársele intercambiador iónico.

Un desmineralizador es un tanque con una entrada, de agua a tratar, en la parte superior y una salida, de agua tratada, en la parte inferior, incluyendo para su funcionamiento una resina que es la clave para su operación del desmineralizador (figura 1.6).

Las resinas son moléculas complejas de hidrocarburos con gran facilidad de intercambio iónico. Existen dos tipos: la cationica y la anionica. FIG. 1.7 , que intercambian iones H^+ y OH^- respectivamente.



Resina Cationica
(R - H)



Resina Anionica
(R - OH)

FIG. 1.7 Resina de intercambio iónico.

Al fluir el agua a través de la resina catiodica, cualquier cation del agua reemplazara al hidrogeno de la resina, se combinara en el agua en forma de HCl , H_2CO_3 , ETC. Este proceso continuara hasta que la concentración en el agua que entra al desmineralizador, sea la misma que en la salida, cuando esto sucede se dice que en la resina se ha agotado. La ventaja de las resinas es que pueden utilizarse nuevamente, lavándolas con una sustancia rica en cationes (H^+) como lo es el ácido sulfúrico, esto se conoce como regeneración.

Se sabe que el producto final de un desmineralizador no es una combinación de ácidos diferentes. Para liberarse de ellos, el fluido que se obtiene de la resina catiónica se pasa a través de una resina aniónica en donde cualquier anion del agua reemplazara al oxhidrilo (HO^-) de la resina. Este oxhidrilo se combinara fácilmente con el hidrogeno liberando en la resina catiódica y se formara agua. Fig. 1.8.

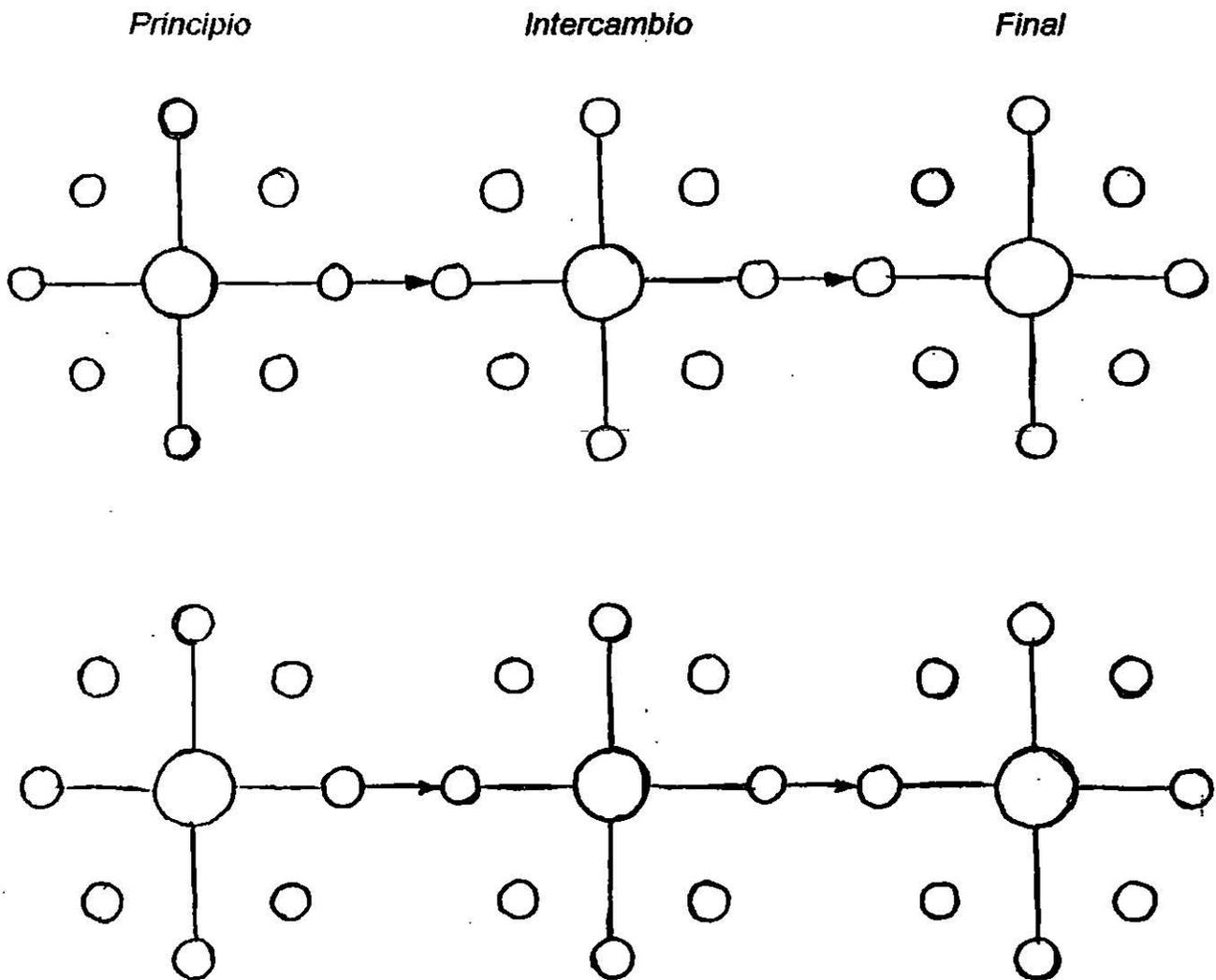


fig. 1.9 intercambio de iones.

Este proceso continuara hasta que la resina anionica se agote. Cuando esto sucede, el agua que sale del desmineralizador tiene la misma cantidad de impurezas anionicas que a la entrada de este.

La resina anionica se regenerara con hidroxido de sodio (Na OH), el cual deposita iones HO^- sobre la resina.

La regeneración de las resinas se inicia a cierto nivel de calidad del agua. que satisfaga los requisitos de operación de la central.

Los sistemas en los que tenemos la cama de resina cationica separada de la anionica se conoce como la unidad cation-anion. Para máxima pureza, después de esta unidad colocamos una unidad de cama mixta. En esta, las resinas cationicas y anionicas están íntimamente ligadas, de tal manera que la eliminación cationica y anionica se lleve a cabo casi simultáneamente. El flujo que sale de esta cama mixta, es mucho mas pura que el de un sistema de dos camas.

Teóricamente la resina duraría para siempre, pero hay cierta cantidad de presión que origina un desgaste. La arena pasa a través de las mallas de salida del filtro posterior que las elimina del resto del sistema.

Existen desmineralizadores donde la resina no tiene forma de cama, sino que esta granulada y ejerce una acción de filtrado. Este sistema se conoce como filtro desmineralizador.

VARIABLES FISICAS

VOLUMEN

Es el espacio ocupado por un cuerpo. Sus unidades son:

cm , ft , etc.

PRESION

Es una fuerza que actúa sobre una arrea. Las unidades son: dinas/cm, lb/in , kg/cm , N/m , etc.

TEMPERATURA

Es una medida de la energía cinética promedio de las moléculas de una substancia. Existen, para medirlas, cuatro escalas: dos relativas centígrada, y Fahrenheit y dos absolutas: kelvin y rankine. y se relacionan de la sig. manera:

$$\begin{aligned}C &= 5/9 (F-32) \\F &= 9/5 (C +32) \\K &= C +273 \\R &= F +460\end{aligned}$$

Ya que la temperatura es una medida de la energía promedio, sig. que conforme aumenta la energía aumentara la temperatura y en el caso inverso al disminuir la energía también disminuye la temperatura. En el cero absoluto (-273 c o 460 f) todo mov. cesa. Para un gas la velocidad de sus átomos o moléculas se relaciona con la temperatura por:

$$V = \frac{1,3 \times 10^4 T}{A}$$

donde :

*V es la velocidad promedio en cm/seg.
T es la temperatura en k.
A es el numero de masa en uma.*

ENERGÍA, TRABAJO Y POTENCIA

ENERGIA

La energía de un cuerpo es la capacidad o habilidad que posee para realizar un trabajo. Podemos clasificarla como energía estática o en espera de ser usada que se conoce como energía potencial, y como energía debida al mov. de los cuerpos llamada energía cinética.

Para determinar la energía potencial que tiene un cuerpo por efecto de la posición en que se encuentra, usamos la ecuación sig:

$$EP = mgh$$

donde:

*EP es la energía potencial, en joules.
m es la masa en kg.
g es la aceleración de la gravedad.
h es la altura a que esta colocado el cuerpo.*

Para el calculo de la energía cinética de un cuerpo usamos la sig. expresión:

$$EC = \frac{1}{2} mv^2.$$

donde:

*EC es la energía cinética.
m es la masa del cuerpo.
v es la velocidad.*

TRABAJO

Es la fuerza que actúa a lo largo de una distancia. Su expresión matemática es:

$$T = F \times d.$$

donde:

T es el trabajo.
F es la fuerza.
d es la distancia.

Las unidades de trabajo son: ft-lb en el sistema ingles, N-m en el MKS, y dina-cm en el CGS. Se observa que las unidades de trabajo y energía son las mismas.

POTENCIA

Se define la rapidez con que se realiza un trabajo. Sus unidades son : watts, BTU/hr, hp, ft-lb/seg, etc.

Las unidades frecuentemente usadas en una central generadora de electricidad son: megawatts térmicos y megawatts eléctricos (MWT) Y (MWE)

Estas dos potencias están relacionadas por la eficiencia de conversión de la central de la sig. forma:

$$\text{eficiencia} = \frac{\text{MWE}}{\text{MWT}} \times 100$$

RELACION MASA-ENERGIA

En 1905 Albert Einstein formula una ecuación que puede usarse para relacionar la variación de energía de una reacción con la diferencias de masas entre los reactivos y los productos.

$$E = mc^2.$$

donde:

E es la variación de energía.

m es la diferencias de masas.

c es la velocidad de la luz (3×10^{10} cm/seg.).

Ecuación que nos señala la variación de masa de un sistema que esta intercambiando energía con sus alrededores.

Si consideramos 1 g de materia que se transforma en energía en un proceso nuclear.

$$E = 1g (3 \times 10^{10} \text{ cm/seg}^2.)$$

$$E = 9 \times 10^{20} \text{ g cm}^2/\text{seg}^2. = 9 \times 10^{20} \text{ ergs} = 8.532 \times 10^{10} \text{ BTU.}$$

Esta tremenda cantidad de energía es suficiente para evaporar 38,000,000 lt. de agua.

Para fines comparativos citemos la energía que se libera de una libra de carbón durante su combustión que es de 12,000 BTU. Esto nos da una idea de la diferencia de energía que se obtiene de un proceso nuclear y en un proceso de combustión.

FUERZAS NUCLEARES

Se mencionó que los electrones están en su órbita debido a su fuerza de atracción que existe en los protones cargados positivamente del núcleo. Entonces en el núcleo debe existir un tipo especial de fuerzas independientes de la acción de las cargas eléctricas. De tal manera que compensen las fuerzas de repulsión existentes entre protones. Además de la fuerza gravitacional entre las partículas del núcleo, existen un tipo de fuerzas denominadas fuerzas nucleares, cuyo rango de acción está dentro del límite del radio nuclear, son únicamente fuerzas de atracción que se representa entre proton-proton, proton-neutron y neutron-neutron. Estas fuerzas son de mayor magnitud que las de repulsión entre proton-proton y por lo tanto son las que evitan la partición del núcleo. La fuerza de repulsión entre protones se reducen si están separados, ya que las fuerzas varían inversamente con el cuadrado de la distancia. Esto sig. que si la distancia entre los protones se duplica, la fuerza se reduce por un factor de cuatro y así sucesivamente. Los neutrones en el núcleo separan a los protones y por lo tanto tienden a reducir las fuerzas de repulsión.

ENERGÍA DE ENLACE Y DEFECTO DE MASA

Aunque sea difícil de comprender, los núcleos tienen masas menores que la suma de sus masas de las partículas que los componen. Calculamos a manera de ejemplo la masa del núcleo de ${}^4_2\text{He}$ que contiene 2 protones y 2 neutrones, la masa del neutrón y del protón la leemos en la tabla 1.1. El peso calculado para el ${}^4_2\text{He}$ sería:

$$2 \times 1.00866 = 2.01732 \text{ uma, masa de dos neutrones.}$$

$$2 \times 1.00759 = 2.01518 \text{ uma, masa de dos protones.}$$

$$4.03250 \text{ uma, masa calculada del núcleo de } {}^4_2\text{He}$$

Puesto que la masa del ${}^4_2\text{He}$ es de 4.002604, la diferencia de masa es:

$$4.03250 - 4.002604 = 0.029896 \text{ uma}$$

Es decir, un núcleo de helio es aproximadamente 0.8% mas ligero que lo que sería de esperarse de las masas de los protones y neutrones que la forman. A esta diferencia se conoce como defecto de masa, representada por m ,

$$m = Zm_p + (A - Z) M_n - MN$$

donde:

- Z es el numero atómico.
- m_p es el numero de masa.
- M_n es la masa del neutrón.
- MN es la masa del núcleo de números Z, A .

En la practica los datos para las masas nucleares son escasos y en su mayoría se refieren a masa atómicas. (tabla 1.3) Por lo que la ecuación anterior se expresa como:

$$m = ZM_H + (A - Z) M_n - M$$

Donde hemos incluido la masa del hidrogeno M_H y M la masa atómica.

Puesto que se considera que la perdida de la masa para los electrones es es relativamente pequeña, es costumbre atribuir toda la perdida a los neutrones y protones, esto es, a los nucleones. de acuerdo con esto, la perdida de masa por nucleón es:

para ${}^4_2\text{He}$; $\frac{0.029896 \text{ uma}}{4} = 0.007474 \text{ uma por nucleón.}$

Se piensa que la perdida de masa asociada con el empaque de neutrones, protones y electrones, es el resultado de la conversion de masa en energia. Esta energia, denominada energia de enlace puede definirse como la energia que sería necesaria un atomo de neutrones, protones y electrones separados y corresponde al equivalente energetico de la perdida de masa calculado por la ecuacion $E = mc$, o bien utilizando el factor de conversion de masa a energia, $1 \text{ uma} = 931 \text{ MeV}$, de la siguiente manera:

$$\text{Energía de enlace} = BE = 931m.$$

La energía de enlace se registra generalmente en términos de energía por nucleón, para poder dar comparaciones entre diversos nuclidos. La energía de enlace por nucleón de los átomos de ${}^4_2\text{He}$ es:

$$\frac{BE}{A} = 931 \frac{\text{MeV}}{\text{uma}} (0.007474 \frac{\text{uma}}{\text{nucleón}}) = 6.9583 \text{ MeV / nucleón.}$$

Esta energía se libera en la formación del Helio o es la requerida para desintegrarlo. la figura 1.10 es una gráfica que muestra la perdida de masa por nucleón y la energía de enlace por nucleón en función del numero de masa. La energía máxima es de aproximadamente de 8.7 MeV con un numero de masa de 60. Los valores graficados en la curva son los promedios de la energía de enlace por nucleón. Arriba de un $A=20$, la energía de enlace permanece prácticamente constante, pero decrece prácticamente de 60 para arriba. Esta disminución aunada al incremento de las fuerzas de repulsión debido al aumento del numero de protones, conduce eventualmente a la inestabilidad de los núcleos en los átomos mas pesados. La inestabilidad de los elementos pesados, sugiere la posibilidad de que sus núcleos se descompongan espontáneamente.

ELECTRON POPULACION OF THE ELEMENTS

Atomic Number	Element.	shells and ubshells filled								
		1 s	2 s p	3 s p d	4 s p d f	5 s p d f	6 s p d f	7 s		
1	H	1								
2	He	2								
3	Li	2	1							
4	Be	2	2							
5	B	2	2	1						
6	C	2	2	2						
7	N	2	2	3						
8	O	2	2	4						
9	F	2	2	5						
10	Ne	2	2	6						
11	Na	2	2	6	1					
12	Mg	2	2	6	2					
13	Al	2	2	6	2	1				
14	Si	2	2	6	2	2				
15	P	2	2	6	2	3				
16	S	2	2	6	2	4				
17	Cl	2	2	6	2	5				
18	Ar	2	2	6	2	6				
19	K	2	2	6	2	6	1			
20	Ca	2	2	6	2	6	2			
21	Sc	2	2	6	2	6	2			
22	Ti	2	2	6	2	6	2			
23	V	2	2	6	2	6	2			
24	Cr	2	2	6	2	6	1			
25	Mn	2	2	6	2	6	2			
26	Fe	2	2	6	2	6	2			
27	Co	2	2	6	2	6	2			
28	Ni	2	2	6	2	6	2			
29	Cu	2	2	6	2	6	1			
30	Zn	2	2	6	2	6	2			
31	Ga	2	2	6	2	6	2	1		
32	Ge	2	2	6	2	6	2	2		
33	As	2	2	6	2	6	2	3		
34	Se	2	2	6	2	6	2	4		
35	Br	2	2	6	2	6	2	5		
36	Kr	2	2	6	2	6	2	6		
37	Rb	2	2	6	2	6	2	6	1	
38	Sr	2	2	6	2	6	2	6	2	
39	Kr	2	2	6	2	6	2	6	1	2
40	Rb	2	2	6	2	6	2	6	2	2

FÍSICA DE NEUTRONES

INTRODUCCION

Debido a que los neutrones son partículas pesadas y con carga eléctrica neutra, tienen propiedades que los hacen especialmente interesantes e importantes en la ciencia y tecnología contemporáneas. La mayoría de las reacciones nucleares inducidas por neutrones, son fuentes de información acerca de los núcleos, además es posible producir nuevas especies nucleares. Esos núcleos artificiales tienen aplicaciones en otras ramas de la ciencia, tales como la química, biología y medicina.

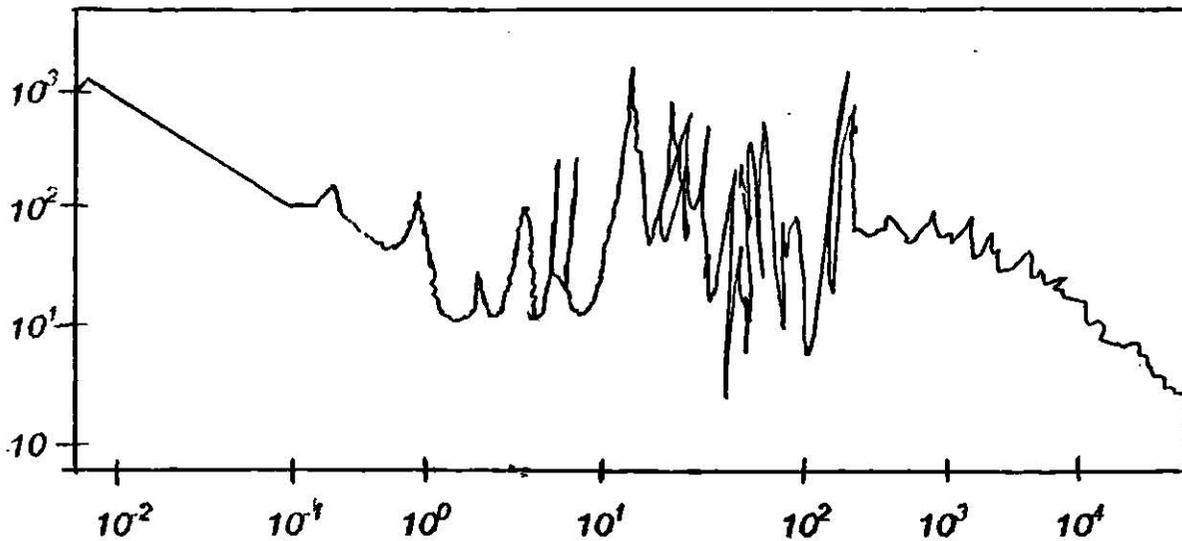
El uso más directo de los neutrones está en las reacciones en cadena involucrando materiales fisiles. Estas reacciones, en cadena, tienen aplicaciones militares, en las bombas atómicas y, para fines pacíficos, los reactores nucleares. Siendo estos una importante fuente de calor y, por tanto, de energía eléctrica.

El objeto del presente capítulo es conocer el uso y la aplicación de la Física de Neutrones en un sistema que permite tener reacciones de fisión controladas y, nos permita aprovechar la energía liberada en dichas reacciones. A este sistema lo conocemos con el nombre de reactor nuclear.

EL REACTOR NUCLEAR

Como previamente hemos dicho, el reactor es un sistema en donde se llevan a cabo las reacciones de fisión. Este sistema deberá tener núcleos fisibles, llamándose a estos combustibles. Para nuestro caso (laguna verde) el combustible es UO_2 , el cual contiene una cierta cantidad de U^{235} .

Este se fisiona con neutrones de cualquier energía, siempre y cuando los haya absorbido. Como recordaremos en el capítulo anterior de radiación, establecimos que la probabilidad de que un neutrón se absorba en un núcleo depende tanto del núcleo como de la energía del neutrón, en el momento de la interacción. Dicha probabilidad está determinada por la sección eficaz microscópica. Analizando la figura 2.1 observamos que existen muchas energías en las cuales el núcleo tiene una gran probabilidad de absorber el neutrón.



Pero, existe el problema de que la probabilidad de que el neutrón tenga exactamente la energía para que ocurra mas fácilmente una absorción es demasiado baja. Ya que los neutrones, al estar viajando mediante dispersiones, pierden energía en cada momento. Nótese que nuestro reactor nuclear no está compuesto de combustible únicamente.

Entonces, lo que debemos hacer es llevar el neutrón a una energía con la cual permanezca el mayor tiempo posible. Esta energía es la térmica, en la cual el U^{235} presenta una gran sección eficaz de fisión. Por tanto nuestro reactor deberá tener también una sustancia que permita que el neutrón pierda energía hasta llegara al equilibrio térmico con el medio. A esta sustancia le llamamos moderador.

Como estudiaremos mas adelante, al ocurrir una reacción de fisión hay liberación de energía, la cual se deberá remover del reactor para no alentar contra su integridad física, además al remover puede ser aprovechada de algún modo. Entonces, el reactor deberá tener además de combustible y moderador, un medio que le permita remover la energía liberada, dicho medio le llamamos refrigerantes.

Aunado al combustible, refrigerante y moderador deberá, el reactor, poseer un mecanismo que nos permita controlar la reacción en cadena. Este mecanismo es el de Barras de Control, cuyo funcionamiento analizaremos según vayamos avanzado en el tema.

Para un reactor nuclear del tipo de Laguna Verde, el arreglo de combustible, moderador, refrigerante y barras de control esta ilustrado en la figura 2.2.

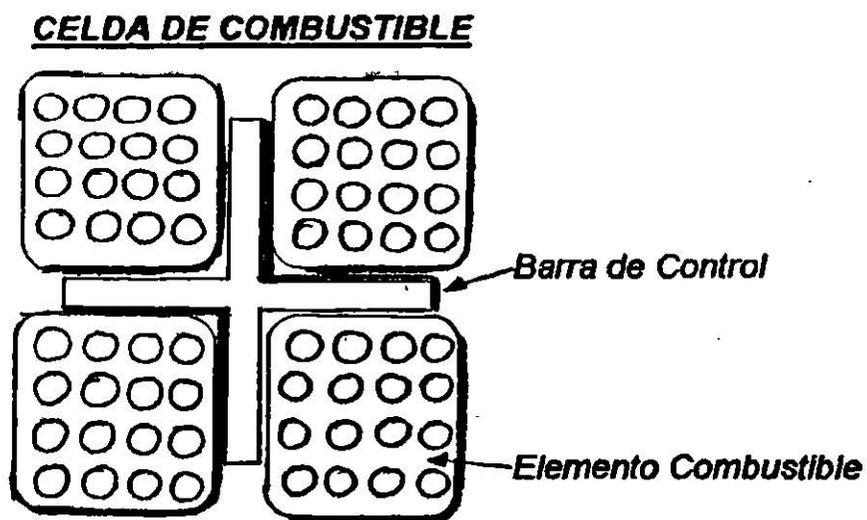
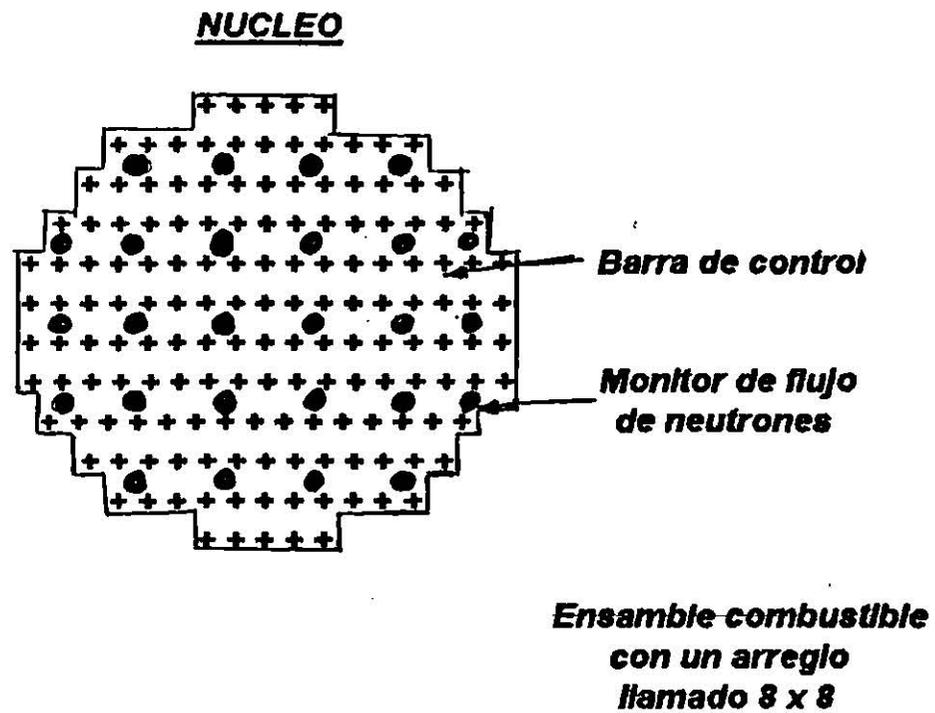
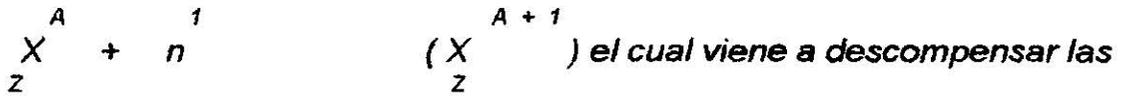


Figura 1.2 Núcleo y celda combustible de un BWR

El estado de excitación del núcleo se logra mediante la absorción de un neutrón formándose en núcleo compuesto:



el cual viene a descompensar las fuerzas nucleares y coulombianas. De acuerdo a quien sea el núcleo y la energía del neutrón absorbido podría o no llevarse a cabo el proceso de fisión, pero recuerde que el U^{235} se fisgona con neutrones de cualquier energía.

Usualmente, los fragmentos de fisión no son del mismo tamaño y debe a que son núcleos pesados, tienen una relación Neutrón/Protón grande, es decir tiene exceso de neutrones. Para reducir ese exceso emiten 2 o 3 neutrones, algunos de los cuales se manifiestan antes de un tiempo máximo de 10^{-17} segundos, después de ocurrida la fisión. A este tipo de neutrones les llamaremos neutrones- protones. Existe otro tipo de neutrones, de los mismos 2 o 3 emitidos, que se hacen presentes en un rango de tiempo que puede ir de segundos a días. A estos les llamaremos neutrones retardados y a los núcleos que les emiten precursores de neutrones.

Dependiendo del núcleo fisionado, será el numero promedio de neutrones producidos, esto se muestra en la Tabla 2.1.

T A B L A 2.1.	
PRODUCCION PROMEDIO DE NEUTRONES PARA DIFERENTES NUCLEOS FISIBLES	
ELEMENTO FISIBLE	PRODUCCION ()
${}^{235}_{92} U$	2.44
${}^{233}_{92} U$	2.54
${}^{239}_{94} Pu$	2.88

En la producción promedio consideramos los neutrones prontos y los retardados. Cabe adelantar, que ambos tipos, nacen con energías rápidas, es decir con mas de 1 MeV.

La aplicación de los fragmentos de fisión es estadística y depende también, del núcleo fisionando, de manera tal que podemos obtener gráficas como la mostrada en la fig. 2.5. Debido a que, en un reactor nuclear, el numero de fisiones es bastante alto, es posible obtener como fragmentos de fisión a casi todos los isótopos de la tabla de nuclidos, siendo su mayoría radioactivos. Cada uno de estos tiene una cadena de decaimiento. a los isótopos que componen a la cadena le llamaremos productos de fisión (incluyendo el primero) por ejemplo: consideramos:

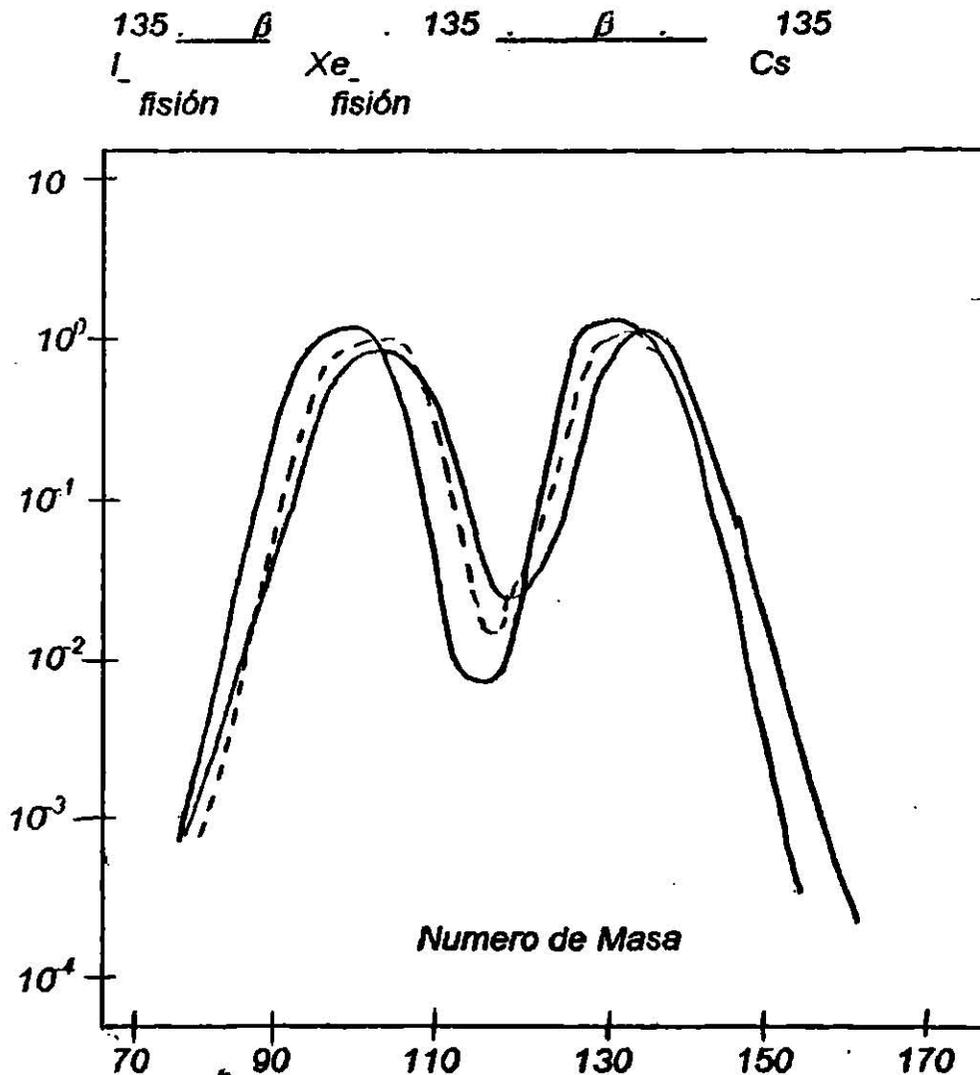


Fig. 2.5 Rendimiento de fragmentos de fisión obtenidos en la fisión térmica del U^{235} , U^{238} y Pu^{239}

De la energía liberada no todo es aprovechable, ya que la única forma de hacerlo es frenar las partículas involucradas en la liberación. Por que el total de neutrinos, como no interaccionan con la materia, se llevan 11 MeV y algunas otras partículas, (principalmente rayos gamma) que se fuguen del sistema, se llevan aproximadamente 144 MeV. Por esto aprovechamos 175 MeV por fisión.

Como 1 MeV es igual a 1.6×10^{13} watts-segundos, una fisión producirá 175 $(1.6 \times 10^{13}) = 2.8 \times 10^{-11} = 3.5714 \times 10^{10}$ fisiones para producir un watt-segundo. El numero de fisiones/segundo en el reactor esta dado por la formula 2.5.

$$\text{fisión/segundo} = \frac{\phi \Sigma v}{r}$$

entonces la potencia aprovechable, en Watts, será.

$$P = \frac{\phi \Sigma v}{3.6 \times 10^{10}}$$

Esta ecuación es solo una aproximación, que será valido solo si consideramos que el volumen del reactor no esta cambiando (es decir que el combustible no se gasta) de otra manera tanto el volumen como Σ_f estaria decreciendo.

Con esta consideración y como las fisiones son, en su gran mayoría por neutrones térmicos, la potencia es proporcional al flujo térmico:

$$P = C \phi$$

donde:

$$C = \frac{\Sigma_f v}{3.6 \times 10^{10}}$$

FUENTES INSTALADAS DE NEUTRONES

Cuando se realiza una fisión, existe producción de neutrones, los cuales se encargaran de realizar nuevas fisiones. Esto es se llevara a cabo una reacción de fisión en cadena. Para tener las primeras fisiones es necesario proporcionar neutrones al sistema. Las reacciones nucleares son la única forma de producir neutrones, omitiendo, claro, a los núcleos no naturales (precursores) que tienen la propiedad de emitirlos.

Existen otros tipos de fuentes de neutrones, tales como Am-Be en las cuales americio emite una partícula alfa, que permite la reacción (α, n) con el Be^9 . Pero la fuente instalada de neutrones mas importante durante la operación de un reactor nuclear es de la Sb - Be.

TEORIA DE FRENADO

Debido a que todos los neutrones que se producen en el reactor nuclear son rápidos y, como vimos en la sección 1.2, requieren neutrones térmicos, es necesario analizar el proceso mediante el cual los neutrones van perdiendo energía en su paso a ser absorbidos y posiblemente causar fisión.

Un tratamiento riguroso y completo acerca del frenado de neutrones necesita de la ayuda de matemáticas complejas. Para fines prácticos consideraremos que el frenado de neutrones es solo mediante dispersiones elásticas. La cantidad de energía que un neutrón pierde en una sola colisión, podemos calcularlas resolviendo las ecuaciones de momento y de energía en dos sistemas de referencia. El primero, el sistema de laboratorio, en el cual consideramos que el núcleo blanco esta en reposo antes de la colisión. El segundo sistema es el de centro de masa, en el cual el centro de masa del sistema, neutrón-núcleo, lo consideramos en reposo; con esto, tanto el núcleo blanco como el neutrón se acerca al centro de masa. Lo anterior da como resultado que la mínima energía con la que el neutrón se queda es pues de una colisión y viene dada por:

$$E_f = \epsilon E_i$$

donde:

E_f es la energía del neutrón después de una colisión.
 E_i es la energía del neutrón antes de una colisión.

$$\alpha = \frac{(A-1)^2}{A+1}; \quad A \text{ es el numero de masa del núcleo blanco.}$$

De acuerdo a la ecuación, entre menor sea el número de masa, el núcleo tiene más facilidad de hacer que el neutrón pierda energía. Existen un término que determina la pérdida de energía de colisión, llamado promedio logarítmico de energía perdida por colisión, el cual denotamos con la letra ξ el cual tiene un valor que depende de la sustancia usada como moderador. Para que pueda existir pérdidas de energía, primero debe de existir un evento de dispersión. Si recuerda que lo que determina la probabilidad de ocurrencia de dicho evento es la sección eficaz de dispersión, entonces esta medida de la probabilidad es una condición para que el neutrón pierda energía, en base a esto, definiremos el poder desfrenado :

$$\text{poder de frenado} = \xi \Sigma_s$$

Sin embargo, este parámetro no es suficiente para describir lo eficiente que pueda ser un material para moderar neutrones, debido a que no toma en cuenta pueda también existir absorción. Para establecer una completa comparación entre un moderador y otro usamos un parámetro llamado razón de moderación, definido como:

$$\text{Razón de Moderación} = \xi \frac{\Sigma_s}{\Sigma_a}$$

El número de colisiones (n), necesarias para que un neutrón típico de fisión ($E = 2\text{MeV}$) llegue a tener energía térmica en un medio cuya temperatura es de 20 grados C ($E = 0.025\text{ eV}$) se calcula dividiendo el logaritmo natural de la pérdida total de energía, término llamado letargia, entre la pérdida promedio logarítmica de energía por colisión de la manera sig:

$$(n) = \frac{1 \ln (2 \times 10^6 \text{ eV}) (- \ln 0.025 \text{ eV})}{\xi}$$

$$(n) = \frac{\ln (2 \times 10^6)}{\xi \cdot 0.025}$$

En la tabla 2.3 se tabulan valores para α , ξ , $\xi \Sigma_s$, $\xi \Sigma_s / \Sigma_a$ y (n) para moderadores típicos. Como podremos observar, el mejorador es el D_2O (agua pesada), ya que su razón de moderación es mayor.

TABLA 2.3**PROPIEDADES DE ALGUNOS MODERADORES**

# DE MASA	MODE-RADOR	α	ϵ	$\epsilon \Sigma_s$	$\epsilon \Sigma_g / \Sigma_a$	(n)	densidad (g/cm)
1	H		1.00			18.19	GAS
2	D	0.111	0.725			25.10	GAS
1.33	H ₂ O		0.920	1.35	71	19.77	1.0
3.24	D ₂ O		0.509	0.175	5670	35.75	1.1
4	He	0.360	0.425	1.6X10	83	42.81	GAS
9	Be	0.640	0.207	0.158	143	87.96	1.85
12	C	0.716	0.158	0.060	192	115.17	1.60

FACTOR DE MULTIPLICACION, REACTOR INFINITO

Para efectuar la reacción de fisión se necesitan neutrones. En un principio, cuando el combustible está limpio (no ha tenido ninguna reacción nuclear) tenemos que proporcionar neutrones al sistema mediante una fuente. Una vez realizada la fisión, hay producción de neutrones al sistema mediante una fuente. Una vez realizada la fisión, hay producción de neutrones, los cuales causarán nuevas fisiones, obteniéndose nuevos neutrones y así sucesivamente. A esto le llamamos una reacción en cadena y puede continuar hasta que se agote el combustible o se pare de alguna manera. Debido a esto, seguiremos los posibles eventos que pueden suceder a los neutrones, considerando que el sistema (reactor nuclear) en lo que vamos a hacer es infinitamente grande lo que, consecuentemente, no permite que haya fuga de neutrones.

Los neutrones " nacen " en el combustible siendo rápidos y pueden ser absorbidos en el combustible y producir fisión, llamada fisión rápida, o captura radioactiva. Pero lo más probable es que sea dispersado fuera del combustible, encontrándose ahora en el encamisado, el cual es una aleación de zirconio y zinc principalmente. Dichos elementos poseen muy baja sección eficaz de absorción, entonces los neutrones llegan al moderador, que también hacen las veces de refrigerante.

Una vez que el neutrón está en el moderador, puede suceder que se modere, no sea absorbido, pues el moderador (H_2O) puede presentarse la reacción $O(n, p) N^{16}$ aunque con muy poca probabilidad ya que el O^{16} tiene una sección eficaz del orden de micro barns. Por consiguiente, lo más probable es que el neutrón se modere y llegue a la energía térmica. ¿Que le puede suceder en este nivel de energía? dados que los materiales del reactor tienen una sección para neutrones térmicos serán absorbidos. Aunque en el material estructural, moderador, encamisado, barras de control y otros en el combustible. finalmente, la mayoría de los absorbidos en el combustible causarán fisión, por cada uno que lo haga habrá liberación de energía y se producirá un promedio de 2.44 neutrones por fisión completándose así el ciclo del neutrón.

Si el reactor contiene un átomo de material fisible, una vez que ese átomo ya no habrá otros. A esta no podemos llamar una reacción en cadena. Surge ahora otra pregunta. ¿Que cantidad de material fisible es necesaria para obtener una reacción en cadena?. Esta cantidad depende del combustible, el moderador y la geometría del reactor. Para cada diseño del reactor, habrá una masa crítica, que definimos como la mínima masa de combustible necesaria para tener una reacción en cadena.

Si el reactor se construye exactamente con la masa crítica y se le proporciona una cantidad de neutrones térmicos, algunos causaran fisión, y después que los neutrones producidos en la fisión adquiera energía térmica tendremos el mismo numero de neutrones térmicos en esta generación y en la anterior. Si los neutrones proporcionados fuesen rápidos y, se les permite cumplir su ciclo, el numero de neutrones rápidos en la segunda generación seria el mismo que en la primera. En este caso hablamos de un reactor en el cual la población de neutrones permanece cte. generación tras generaciones el reactor contiene menos masa crítica, la segunda generación será menor que la primera, la tercera menor que la segunda, y así hasta que no haya mas fisiones; si la masa fuese mayor que la crítica la población neutronica ira en aumento generación tras generación.

Esta idea de aumento y disminución en la población neutronica la expresamos en términos del factor de multiplicación cuyo símbolo es k y se define como:

$$K = \frac{\text{numero de neutrones en una generación}}{\text{numero de neutrones en la generación precedente}}$$

Entonces si $K = 1$, la población neutronica permanecerá constante, si $K < 1$ la población decrecerá y si $K > 1$ el numero de neutrones ira en aumento. Para cada uno de esos tres casos la potencia se comportara de igual manera, ya que es proporcional al flujo de neutrones, luego, podemos decir que si:

- $K = 1$ el reactor es critico.*
- $K < 1$ el reactor es subcritico.*
- $K > 1$ el reactor es supercritico.*

Los reactores de potencia son diseñados para tener una $K > 1$ puesto que si se diseñan con $K = 1.00$, después de las primeras fisiones, que implican consumo de átomos fisiles, el reactor se haría subcritico.

Para controlar el valor de k y como consecuencia la potencia, lo hacemos mediante las barras de control. Estas contienen tubos de acero inoxidable llenos de material que tienen una gran sección eficaz de absorción para neutrones térmicos, cuya influencia lo ilustra la figura 2.7.

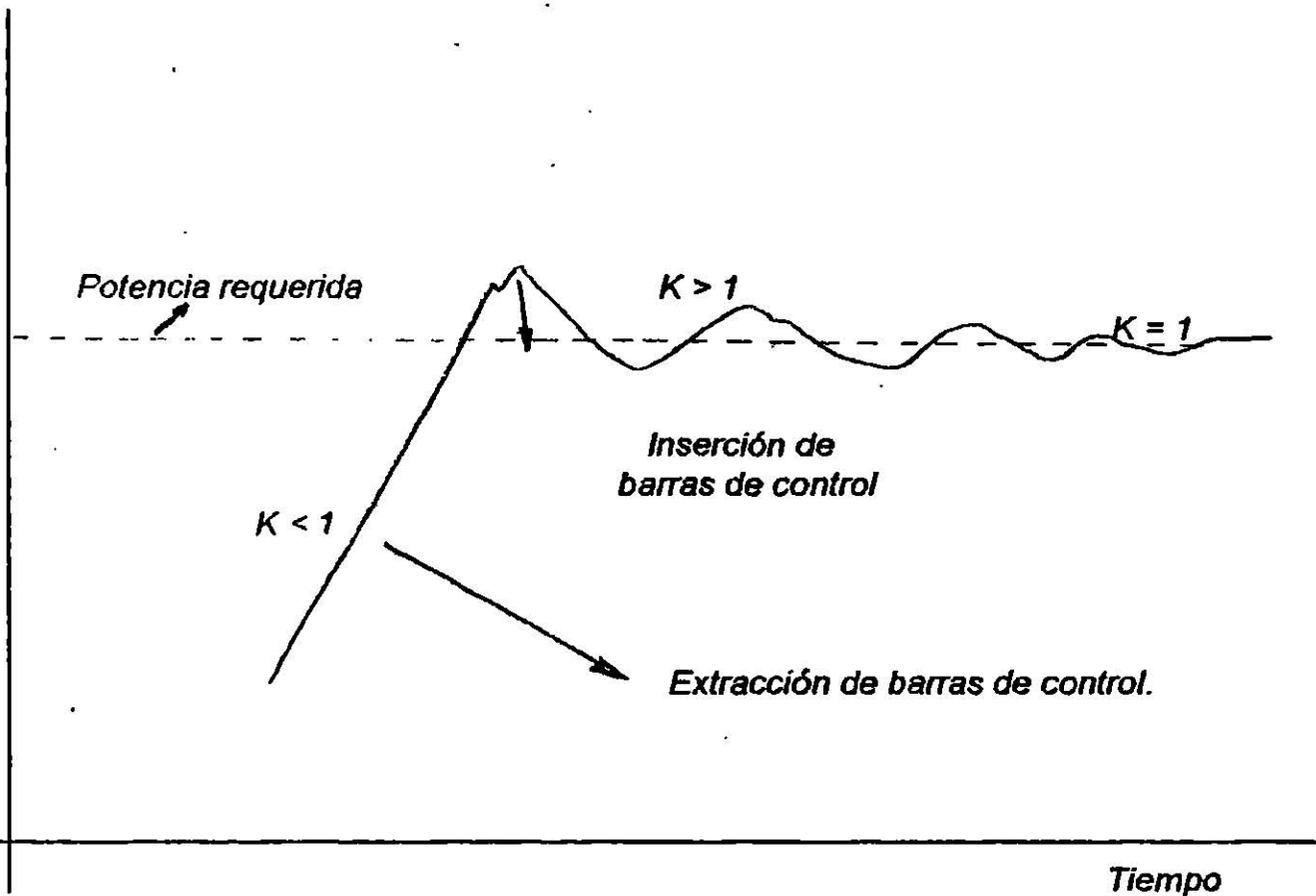


Fig. 2.7 Influencia de las barras de control en el flujo de neutrones o potencia del reactor.

Para saber cuantos neutrones habrá en una generación posterior es necesario seguirlos durante todo su ciclo, y analizar las posibles causas que pueden aumentarlos o disminuirlos.

Consideremos un numero N_1 de neutrones que nacen en un reactor infinito, el numero de neutrones en la sig. generación, N_2 , será igual a N_1 multiplicado por los cambios, fraccionales de dicha población a través de todo el ciclo.

Lo primero que puede pasarle a nuestros neutrones de fisión es que algunos de ellos se absorben en el combustible y causen fisión rápida y, algunos lo hacen, N_1 se vera incrementada. Entonces definiremos el factor rápida (ϵ) como:

$$\epsilon = \frac{\text{numero de neutrones rápidos después de fisión rápida}}{\text{numero de neutrones rápidos producidos por fisión térmica.}}$$

El cual físicamente nos indica como se ve incrementada N_1 debido a fisiones rápidas, hasta aquí tendremos que $N_2 = N_1$.

De aquí todos los neutrones producidos, por fisión rápida o térmica, pasaran a moderarse existiendo la posibilidad de que sean absorbidos mientras lo hacen. La mayoría de las absorciones que ocurren durante el frenado corresponden en las capturas en las resonancias de U^{235} . Nuestro interés es saber cuantos neutrones siguen ahora en el ciclo. En base a esto definiremos la posibilidad de escape a la resonancia (p) como:

$$p = \frac{\text{numero de neutrones rápidos}}{\text{las resonancias mientras son frenados.}} \cdot \frac{\text{numero de neutrones de fisión que empiezan el proceso de moderación.}}$$

Esta probabilidad nos indica físicamente la fracción de neutrones de los de N_1 que aun continúan en el ciclo. Hasta aquí tenemos aun N_1 neutrones térmicos. De acuerdo este numero habrá algunos que se absorberá en el combustible, definiremos el factor de utilización térmica (f) como:

$$f = \frac{\text{numero de neutrones absorbidos en el combustible}}{\text{numero de neutrones absorbidos en todo el reactor.}}$$

Las reacciones mas utilizadas son las (α, n) y la (γ, n) debidos a los aspectos prácticos que las envuelven. Ya que si quisiéramos efectuar una reacción del tipo (p, n) o (d, n) , tendríamos que acelerar de alguna forma las partículas proyectil para que las reacciones puedan llevarse a cabo. En cambio existen núcleos radioactivos que emiten espontáneamente alfas y gammas, con energía suficiente, para producir una reacción en el cual la partícula resultante sea un neutrón. como núcleo blanco, principalmente se usa el Be9 debido a que se pueden presentar tanto las reacción $Be^9(\alpha, n) Be^8$ y $Be^9(\gamma, n) C^{12}$. Las gammas necesaria para efectuar la reacción (γ, n) , generalmente es proporcionada por el Sb^{124} , el cual es un isótopo producido por la activación del Bsb^{123} . Entonces, ya se puede hablar de una fuente instalada de neutrones de Sb-Be, en la cual ocurre la reacción $Be^9(\alpha, n) Be^8$.

Además el Be^8 , tiene la propiedad de fisionarse espontáneamente en dos partículas alfa, las cuales efectuaran la reacción $Be^8(\alpha, n) C^{12}$.

La forma física de una fuente de neutrones del tipo Sb-Be esta ilustrada en la figura 2.8, la cual muestra un encamisado de berilio cubriendo a una barra de antimonio. El antimonio de la barra no es totalmente Sb^{124} , sino que también contiene Sb^{123} , el cual, al estar en el campo de acción de un flujo de neutrones, como es el caso de un reactor nuclear, se activa convirtiéndose en Sb^{124} ; por eso la fuente Sb-Be es una fuente regenerativa de neutrones.

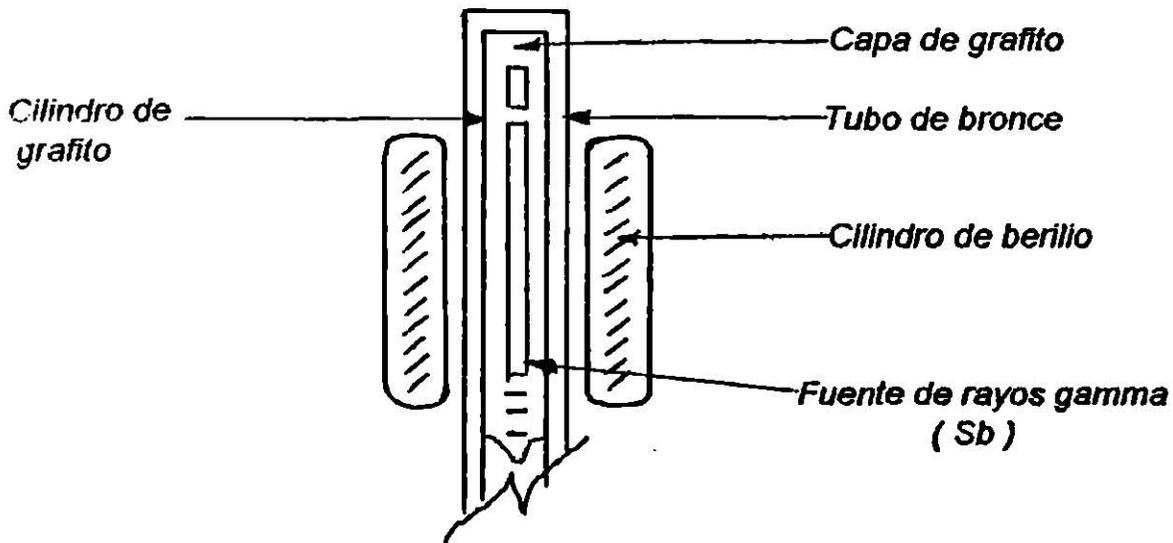


Fig. 2.6 Fuente de antimonio - berilio.

esto, lo expresamos matemáticamente como:

$$f = \frac{\text{combustible}}{\text{reactor}} = \frac{\phi \Sigma_a}{\phi \Sigma_a} = \frac{\text{combustible}}{\text{reactor}} = \frac{\Sigma_a}{\Sigma_a}$$

Este factor determina que fracción de los $N_{1,EP}$ neutrones se absorben en el combustible. Aquí tenemos $N_{1,EP}$ neutrones térmicos absorbidos en el combustible. Entonces, cuántos causaran fisión?. Esto lo determina la probabilidad relativa (g) de que los neutrones absorbidos en el combustible causen fisión, esta será:

$$g = \frac{\text{numero de neutrones térmicos que causan fisión}}{\text{numero de neutrones térmicos absorbidos en el combustible (} U^{238} + U^{235} \text{)}}$$

En función de sus secciones eficaces:

$$g = \frac{\phi \Sigma_f^{235}}{\phi \Sigma_{a,235} + \phi \Sigma_{a,238}} = \frac{\Sigma_f^{235}}{\Sigma_{a,235} + \Sigma_{a,238}}$$

y tenemos ya que $N_1 \epsilon p f g$ neutrones térmicos que causan fisión.

Cuanto vale N_2 ? N_2 es igual a $N_1 \epsilon p f g$ neutrones térmicos que causan fisión multiplicado por el número promedio de neutrones producidos por cada fisión (ν).
entonces:

$$N_2 = N_1 \epsilon p f g \nu$$

de la definición de factor de multiplicación, y reorganizando.

$$\frac{N_2}{N_1} = \epsilon p f g \nu = K$$

si a $g \nu$ le llamamos factor de refrigeración neutronica (η) tendríamos finalmente que:

$$K = \epsilon p f \eta$$

La ecuación 2,12 la conocemos como formula de los cuatro factores y al valor de K , debido a que indica el comportamiento de la población neutronica para un factor infinito, como K_∞ y por lo tanto $K_\infty = \epsilon p f \eta$.

TEORIA DE DIFUSION, REACTOR FINITO

En un reactor infinito fuera homogéneo es decir una mezcla de átomos de combustible, moderador, materiales estructurales y mecanismos de control, de tal manera que cualquier volumen de cualquier parte del reactor fuese idéntico a otro volumen de otra parte de ese mismo reactor, el flujo de neutrones sería el mismo en esos dos volúmenes. Para un reactor acotado, es decir, finito, y que también fuera homogéneo, el flujo electrónico se distribuiría de tal forma dada por la geometría de dicho reactor, de tal manera que en los extremos habrá siempre menor flujo. Esto es debido a que existen fugas de neutrones por el arrea periférica del sistema. Esto viene a afectar la forma de la ecuación $K\alpha$, pues para un reactor finito tenemos que definir una K donde tomemos en cuenta términos de no fuga tanto rápida como térmica, dicha K la llamaremos K efectiva (K_{eff}).

El cálculo de la probabilidad de que un neutrón se fuge o no del sistema, tiene implicaciones matemáticas y físicas bastante fuertes. Es por eso que en algunos de los desarrollos sig. usaremos resultados probados.

Consideramos un neutrón de fisión que comienza a moderarse. Este viajara una distancia hasta alcanzar la energía térmica. Al radio vector que une el punto donde comienza la moderación y el punto donde alcanza la energía térmica le conocemos como $\nu\tau$; donde τ es la "edad de Fermi" y esta medida en cm^2 . Después que el neutrón se ha termalizado es absorbido inmediatamente, sino que se difunde. La distancia que se difunde el neutrón es función de las características del moderador, tales como las secciones eficaces de dispersión y absorción. Al radio vector que une al punto donde el neutrón comienza a difundirse (alcanza la energía térmica) a donde se absorbe, le conocemos como νL^2 ; donde L^2 es el arrea de difusión en cm^2 y viene dada por:

$$L^2 = \frac{D}{\Sigma_a}$$

Donde D es el coeficiente de difusión y es igual a:

$$D = \frac{1}{\Sigma_s (1 - \cos \varrho)}$$

Donde $\cos \varrho$ es el coseno del ángulo de dispersión promedio. El ángulo de dispersión es el que forman las trayectorias del neutrón después de la dispersión y antes de ella. A la suma vectorial de $\nu\tau$ y L le conocemos como longitud de migración (M) la representación tanto de $\nu\tau$ como L viene mostrada en la fig. 2.8.

Donde $\cos \theta$ es el coseno del ángulo de dispersión promedio. El ángulo de dispersión es el que forman las trayectorias del neutrón después de la dispersión y de ella. Λ la suma vectorial de τ y L le conocemos como longitud de difusión (M) la representación tanto de τ como L viene mostrada en la fig.

Además tomemos como un resultado que:

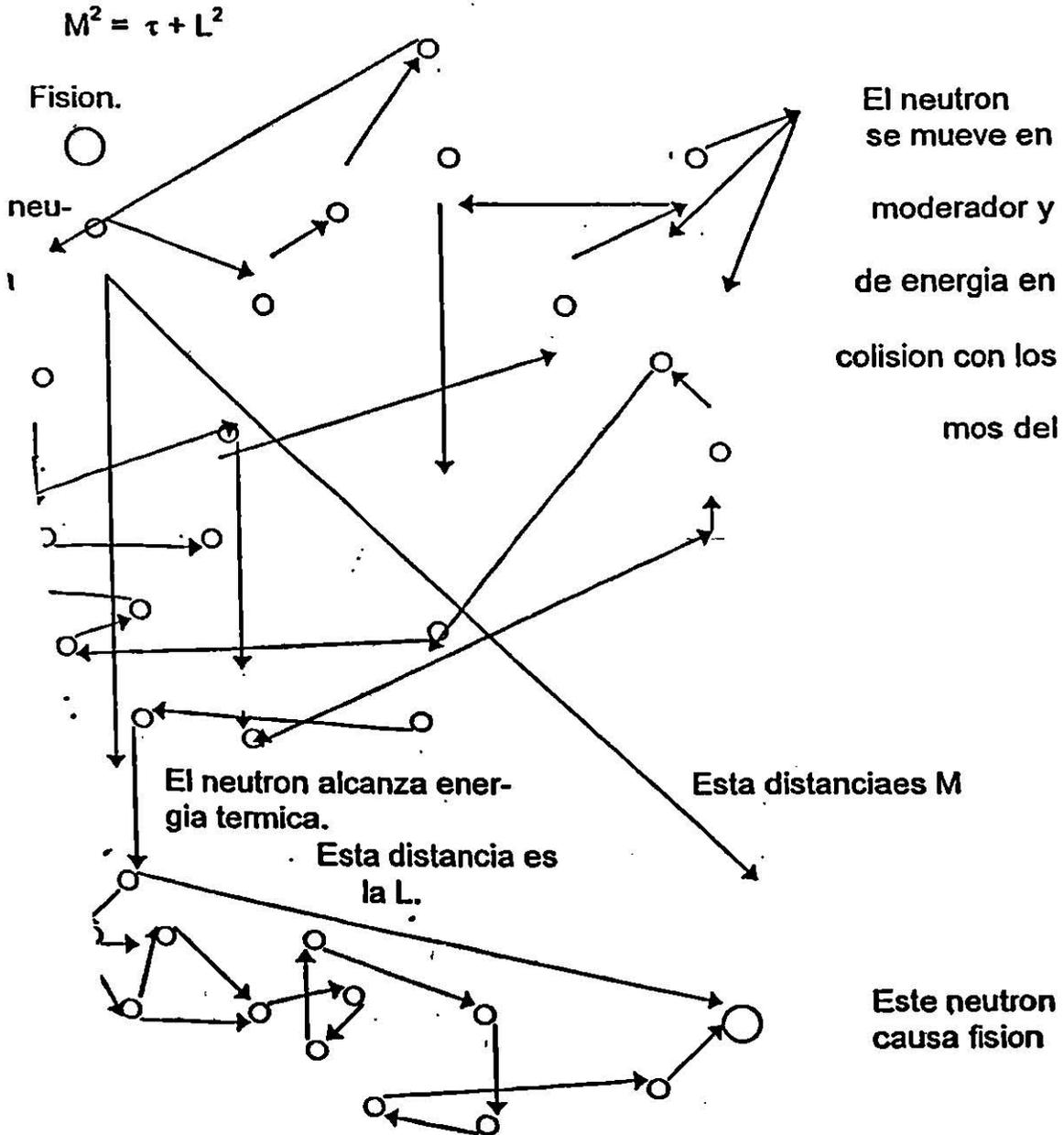


Fig. 2.8 Moderación y difusión de neutrones.

En la tabla 2.4 se reportan los para metros de difusión para algunos moderadores comunes.

TABLA 2.4

PARAMETRO DE DIFUSION PARA ALGUNOS MODERADOR

MODERADOR	DENSIDAD (g/cm ³)	D (cm)	Σ_a (cm ⁻¹)	L (cm)	τ_2 (cm ²)	M (cm)
H2O	1.00	0.16	0.0197	2.85	26	5.84
D2O	1.10	0.87	2.9×10^{-5}	170	131	170
Be	1.85	0.50	1.0×10^{-3}	21	102	23
Grafito	1.60	0.84	2.4×10^{-4}	59	368	62

Una vez que el neutron es térmico podemos establecer un balance neutronico de la sig. manera:

$$\text{Producción} = \text{Absorción} + \text{Fuga}$$

nótese que dicho balance de neutrones térmicos. Matemáticamente podemos escribir que:

$$\begin{aligned} \text{producción (por fisiones)} &= \phi \Sigma_f v \\ \text{Absorción} &= \phi \Sigma_a \\ \text{Fugas} &= -D \nabla^2 \phi \end{aligned}$$

El termino de fugas viene de aplicar la ley de Fick y el teorema de Gauss. Escribiendo el balance en forma matemática y arreglándolo tendremos.

$$\frac{(v \Sigma_f - \Sigma_a) \phi}{D} + \nabla^2 \phi = 0$$

Llamada ecuación de difusión o de balance, que rearmada queda como:

$$Bm^2 \phi + v^{-2} \phi = 0$$

Donde $Bm = \frac{v \Sigma_f - \Sigma_a}{D}$, es el llamado Buckling

El buckling representa el "pandeo" del flujo de neutrones debido a los materiales, ya que si observamos $-Bm^2 = v^{-2} \phi$, entonces Bm^2 es un operador de segundas derivadas (cambios pendientes) del flujo. Sus unidades son, cm^{-2} .

Si tomamos en cuenta que las fugas son iguales a producción menos absorción, entonces la fuga ($-DBm^2$) y el término de no fugas será igual a los neutrones que no se fugan (es decir se absorben) + producción (absorción + fugas) luego la probabilidad de no fuga térmica (L_{th}) es:

$$L_{th} = \frac{\phi \Sigma_a}{(\phi \Sigma_a + Dbm^2 \phi)} = \frac{\Sigma_a}{\Sigma_a + DBm^2}$$

Dividiendo entre Σ_a y utilizando la ecuación:

$$L_{th} = \frac{1}{1 + (Bm^2 l^2)}$$

La deducción de la ecuación de la probabilidad de no fuga cuando el neutrón es rápido (L_r). La omitiremos dado que los procesos matemáticos que la envuelven son los más complejos y baste decir que la probabilidad de no fuga rápida es:

$$L_r = \frac{1}{e^{l^2 Bm^2}} = e^{-l^2 Bm^2}$$

Con estas dos probabilidades, la K_{eff} será igual a:

$$K_{eff} = p f \eta L_{th} L_r = K_{\infty} L_{th} L_r$$

Notemos que la única diferencia que existe entre un reactor finito y uno infinito, es que en el reactor infinito no existen fugas y en el finito sí.

REACTIVIDAD

Cuando un reactor nuclear esta trabajando existen, alejamiento de la criticidad, ya sea debido a distintos parametros implicitos del reactor o maniobras mediante las cuales logran incrementos o decrementos de potencia. Estos cambios se pueden medir en terminos absolutos o fraccionales, al alejamiento absoluto de la criticidad se le conoce como K en exceso (K_{ex}).

$$K_{ex} = K_{eff} - 1$$

O lo que es lo mismo un incremento de K teniendo como base la criticidad entonces podemos decir que $K_{ex} = \Delta k$. Al cambio fraccional entre una K_{eff} del reactor y una K_{eff} de uno le conocemos como reactividad (ρ), matematicamente:

$$\rho = \frac{K_{eff} - 1}{K_{eff}} = \frac{\Delta K}{K_{eff}}$$

La reactividad puede tomar valores positivos (+) negativos (-) y cero, los cuales indican si el reactor es supercritico, subcritico y critico respectivamente. Si hablamos de suministrar reactividad positiva, sacamos barras de control a un reactor critico, para hacerlo supercritico. En caso de que estemos haciendo al reactor subcritico se dice que estamos suministrando reactividad negativa mediante insercion de barras de control.

