

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 3	AÑO 1982

06.82.02

CNEA-AC 34/82

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
Gerencia de Protección Radiológica y Seguridad
MINISTERIO DE SALUD PUBLICA Y MEDIO AMBIENTE
Dirección Nacional de Saneamiento
UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
Facultad de Ingeniería

PREVENCION DE ACCIDENTES DE CRITICIDAD

Lic. Susana I. CANAVESE

Apuntes para el Curso de Post-Grado
en Protección Radiológica y Seguridad Nuclear

BUENOS AIRES

1982

III.1 PREVENCIÓN DE ACCIDENTES DE CRITICIDAD

III.1.1 Introducción

Constantes nucleares

La criticidad define un estado de los materiales fisionables durante el cual se logra el automantenimiento de la reacción de fisión en cadena con una estabilización en el tiempo de la población neutrónica en el seno de dichos materiales.

El estudio de la criticidad desde el punto de vista de la seguridad Nuclear, intenta abarcar a todos los elementos, parámetros y propiedades, que directa o indirectamente, real o potencialmente influyen en este estado de los materiales fisionables.

El concepto de criticidad o estado crítico de un material fisionable se identifica con la expresión:

$$\frac{dN}{dt} = 0 \text{ donde } N \text{ es la población neutrónica}$$

Significa que la población neutrónica es constante en el tiempo. En seguridad Nuclear se trata de obtener sistemas en que:

$$\frac{dN}{dt} < 0$$

Su estudio depende fundamentalmente de la interacción de los neutrones con la materia. Para ello se evalúa lo que sucede en la masa del material fisionable teniendo en cuenta las condiciones de borde y reflexión de dicho material. Exceptuando la fisión, la totalidad de las reacciones nucleares disminuyen o mantienen la energía cinética de los neutrones individuales que participan en ellas, por lo tanto la fisión fija el límite superior de las energías cinéticas. El límite inferior está determinado por la temperatura del medio.

Los neutrones de fisión pueden tener energías superiores a 10Mev, pero la mayoría de los neutrones tiene energías en la región de las 4 Mev. El límite inferior en movimientos térmicos es de 0.025 eV. En el análisis de las constantes nucleares consideraremos neutrones con energías entre 0,0.25 eV y 10 Mev.

Una clasificación de los neutrones de acuerdo a su energía es:

Neutrones térmicos	0.025eV (a temperatura ambiente)
Lentos	0.025eV - 1 Kev
Intermedios	1 Kev - 0.5 Mev
Rápidos	0.5 Mev - 10 Mev

Los neutrones térmicos tienen una energía cinética media aproximadamente igual a la de los átomos o moléculas del medio en que se encuentran y están en equilibrio térmico con ellos, esta energía se llama térmica porque depende de la temperatura del medio.

Si están en un medio poco absorbente adoptan una distribución estadística que corresponde a la ley de Maxwell-Boltzman en función de sus energías cinéticas.

$$\frac{dn}{n} = \frac{2 \pi}{(\pi k \Gamma)^{3/2}} e^{-E/k\Gamma} E^{1/2} dE$$

donde:

dn : número de neutrones con energías comprendidas entre E y $E + dE$

n : número total de neutrones existentes en el sistema

$k = 1.3805 \cdot 10^{-23} \text{ J } \cdot \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$ constante de Boltzman

Γ : temperatura absoluta.

Si se hace que $n(E)$ represente el número de neutrones de energía E por unidad de intervalo de energía, $n(E) \cdot dE$ será el número de neutrones (dn) con energías entre E y $E + dE$ y la ecuación se escribe:

$$\frac{n(E)}{n} = \frac{2 \pi}{(\pi k \Gamma)^{3/2}} e^{-E/k\Gamma} E^{1/2}$$

donde el primer miembro representa la fracción de neutrones con energía E por intervalo de energía. En una distribución de Maxwell-Boltzman la energía que corresponde a la velocidad más probable por unidad de intervalo de energía es $k\Gamma$ y esta expresión se utiliza en la práctica para designar la energía de los neutrones térmicos.

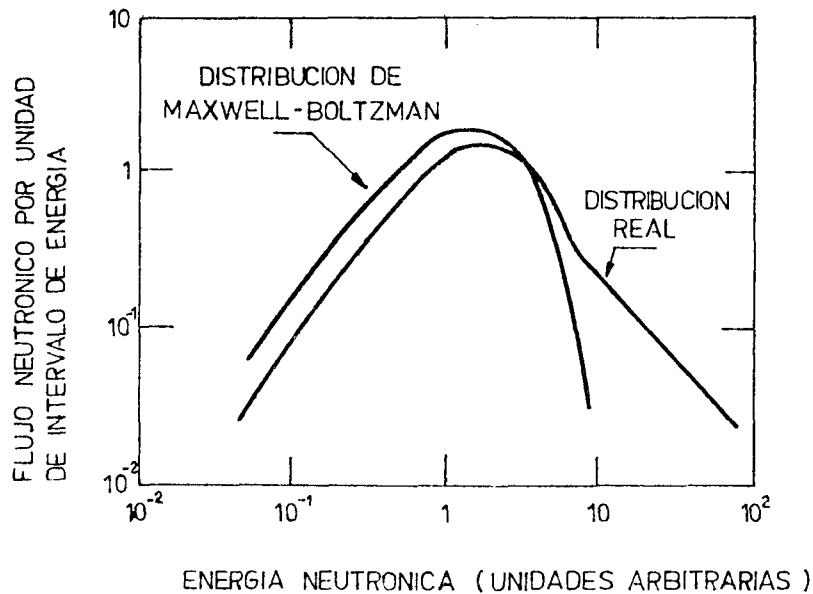
La velocidad más probable de los neutrones térmicos en función de la temperatura absoluta del sistema se expresa como:

$$v \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] = 1.3 \cdot 10^2 \sqrt{\Gamma} \left[\text{ }^\circ\text{K} \right]$$

La distribución de Maxwell-Boltzman de los neutrones térmicos se basa en un modelo muy idealizado de colisiones elásticas, en un medio gaseoso, entre dos clases de partículas (núcleos y neutrones) que no se combinan entre sí. Por distintas causas, estas condiciones no son rigurosamente aplicables en la práctica, por lo que aparecen desviaciones a la distribución ideal de Maxwell-Boltzman correspondiente a la temperatura del medio.

En un reactor térmico, los neutrones producidos por fisión en su mayoría de altas energías, son termalizados principalmente por colisiones con núcleos del moderador y esos neutrones lentos son luego absorbidos por reacciones de fisión y de captura radiactiva.

A consecuencia de ello la proporción de neutrones en la zona de energías altas es mayor que la que corresponde a una distribución de Maxwell-Boltzman; a su vez, debido a que los neutrones moderados tienen mayor probabilidad de ser absorbidos, la proporción de dichos neutrones es inferior a la que cabe esperar de una distribución (de Maxwell-Boltzman) a la temperatura del moderador.



Es conveniente clasificar los núcleos de acuerdo con su número de masa en:

$A < 25$	núcleos livianos
$25 < A < 80$	" medios
$80 < A$	" pesados

Esta clasificación por ser arbitraria no debe aplicarse en forma estricta.

Constantes nucleares macroscópicas y microscópicas

Se analizan dos aspectos fundamentales en la interacción de los neutrones con la materia: el macroscópico y el microscópico.

Si se considera el aspecto macroscópico, la magnitud fundamental es el camino libre medio, que generalmente es del orden del cm.

Si se hace una aproximación microscópica, se define la sección eficaz total del núcleo que en general varía entre 1-10 barn.

Estas dos cantidades no son independientes pudiéndose deducir sus relaciones.

Sea σ la sección eficaz total para un núcleo de un dado material y una determinada energía del neutrón incidente

Si se considera una capa delgada de material de 1 cm^2 de área y de espesor δx y N es el número de núcleos por unidad de volumen, la capa tendrá $N \cdot \delta x$ núcleos.

Se supone un haz de neutrones que incide sobre esa área en forma uniforme y normal. El área efectiva total presentada a los neutrones por esa capa es $N \sigma \delta x$ y es también la fracción de neutrones que sufren una interacción al pasar por esa capa. Se puede decir que $N \sigma \delta x$ es la probabilidad que un neutrón sufra una interacción cuando recorre una distancia δx .

Se supone ahora que el neutrón se mueve sobre una línea recta $(0, x)$ y parte de $x = 0$

Sea $P(x)$ la probabilidad de que un neutrón alcance x sin sufrir ninguna interacción. La probabilidad de que llegue a $(x + \delta x)$ sin sufrir interacción es $P(x)$ multiplicado por la probabilidad de que no sufra interacción al recorrer la distancia δx ; o sea $(1 - \alpha \delta x)$ donde $\alpha = N \sigma$. Entonces

$$P(x + \delta x) = P(x) (1 - \alpha \delta x)$$

desarrollando en serie de Taylor

$$P(x + \delta x) = P(x) + P'(x) \delta x + P''(x) \frac{\delta x^2}{2} + \dots$$

Tomando $\delta x \rightarrow 0$, y comparando

$$P'(x) = -P(x) \alpha$$

Como $P(0) = 1$, se obtiene:

$$P(x) = \exp(-\alpha x)$$

Utilizando esta función distribución la distancia media que recorre un neutrón sin sufrir interacción es:

$$\bar{x} = \int_0^{\infty} x e^{-\alpha x} \alpha dx = \frac{1}{\alpha}$$

o sea:

$$\bar{x} = \frac{1}{\sigma N}$$

Esta expresión da una relación entre la sección eficaz total y el camino libre medio. (CLM).

El camino libre medio es también válido para medios finitos y suelen referirse las dimensiones de un medio en términos de CLM.

Secciones eficaces parciales

La sección eficaz total es la sección eficaz para la suma de todas las reacciones posibles. Si p_i es la probabilidad de que se produzca la reacción i , se define: la sección eficaz σ_i para la reacción i , como:

$$\sigma_i = p_i \sigma_{\text{tot}}$$

Donde σ_{tot} es la sección eficaz total

También

$$\sigma_{\text{tot}} = \sum_i \sigma_i$$

Tipos de interacción de neutrones con la materia

Una posible clasificación de las interacciones de los neutrones con la materia es:

$$\text{DISPERSION} \left\{ \begin{array}{l} \text{elástica} \\ \text{inelástica} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \text{potencial} \\ \text{por núcleo compuesto} \\ \text{por núcleo compuesto} \\ \text{directa} \end{array} \right.$$

$$\text{ABSORCION} \left\{ \begin{array}{l} (n, \gamma) \\ (n, \text{part cargada}); (n, p); (n, \alpha) \\ (n, 2n); (n, 3n); (n, np); (n, 2np) \\ \text{fisión}; (n, nf); (n, 2nf) \end{array} \right.$$

Las reacciones de dispersión pueden considerarse como un intercambio de energía entre las partículas que interactúan quedando un neutrón libre luego de la misma. La mayoría de las reacciones nucleares se producen con formación de núcleo compuesto. De acuerdo a este modelo la reacción nuclear tiene lugar en dos pasos.

- a) La partícula incidente es absorbida por el núcleo blanco formando un núcleo compuesto.
- b) El núcleo compuesto se desintegra con emisión de una partícula (protón, neutrón, partícula α etc.) o un rayo γ dando origen al núcleo residual o producto.

El tipo de desintegración del núcleo compuesto es independiente de la forma en que se originó y sólo depende de propiedades tales como su energía y momento angular.

La desintegración se debe a que el núcleo compuesto formado se encuentra en un estado inestable de alta energía.

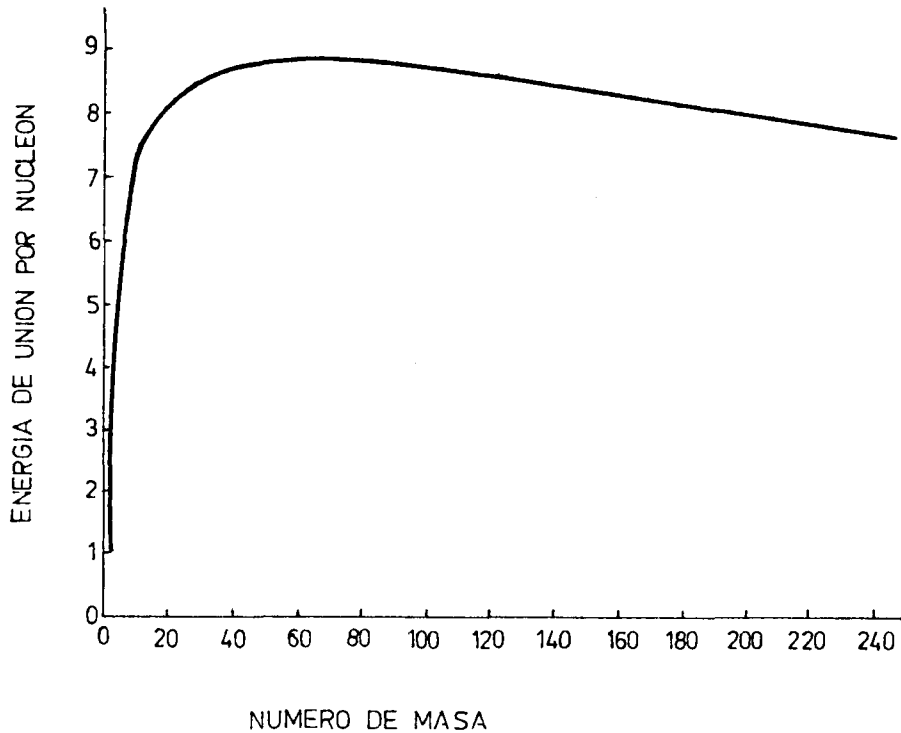
El núcleo compuesto puede ser una especie nuclear conocida o bien una nueva inestable.

Los dos pasos de la reacción podrían sintetizarse de la siguiente forma.

- 1) Núcleo inicial + neutrón incidente \rightarrow núcleo compuesto
- 2) Núcleo compuesto \rightarrow núcleo producto + partícula emitida

Las fuerzas nucleares se manifiestan en forma de energía de unión de las partículas, que es la energía que hay que aplicar al núcleo para liberar una dada partícula (neutrón, protón, α). Esta energía puede aplicarse en forma de ra-

γ y en ese caso es necesario una cierta energía mínima γ para emitir una dada partícula que es equivalente a la energía de unión de dicha partícula. La energía de unión depende del núcleo considerado y varía entre 2 y 9 Mev.



Cuando un núcleo captura un neutrón para formar un núcleo compuesto, la energía de excitación de ese núcleo compuesto es suministrada por la energía de unión del neutrón adicional y su energía cinética.

Dispersión elástica potencial

Son reacciones debidas a la interacción de la longitud de onda asociada al neutrón con el potencial nuclear. Se conservan la masa, cantidad de movimiento y energía del sistema. El resultado es una transferencia de una parte de la energía cinética del neutrón incidente al núcleo blanco.

Estas reacciones son significativas para neutrones de energía mayor de 1 Mev si interaccionan con núcleos livianos y de más de 10 Mev con otros núcleos.

Dispersión elástica por núcleo compuesto

El núcleo compuesto decae emitiendo un neutrón en una energía igual a la del neutrón incidente. Esta interacción se agrega a la dispersión potencial e interfiere con ella. Es una reacción posible para cualquier energía del neu -

trón incidente.

Dispersión inelástica por núcleo compuesto

El núcleo compuesto emite un neutrón de energía cinética menor que la del neutrón incidente, quedando el núcleo excitado. En una reacción de dispersión inelástica, parte de la energía del neutrón incidente se convierte en energía de excitación del blanco que se desexcita emitiendo u no o más fotones.

La energía del neutrón incidente debe ser superior a la e energía mínima de excitación del núcleo blanco; es una reacción que requiere una energía umbral que varía desde 10 Kev hasta algunos Mev dependiendo del núcleo blanco.

Dispersión inelástica directa

Se requiere que la energía del neutrón incidente sea mayor que 10 Mev para poder excitar al núcleo sin la formación de núcleo compuesto. El neutrón incidente sigue su trayectoria y el núcleo se desexcita por medio de una emisión γ .

Reacciones de absorción o captura

Reacción (n, 2n): Es una reacción que necesita cierta energía umbral para producirse, el neutrón incidente debe poseer una energía cinética por lo menos igual que la energía de ligadura de un neutrón al núcleo blanco; es necesario que la energía de excitación del núcleo compuesto sea mayor que la energía de ligadura de dos neutrones para poder emitirse 2 n en general acompañados por una emisión γ .

El umbral para esta reacción está en la zona de 6 a 10Mev.

Reacción (n, 3n): Si la energía de excitación del núcleo compuesto es muy alta puede emitir 3 neutrones casi siempre seguidos por radiación γ . La energía umbral en todos los casos es superior a 10 Mev.

Reacción (n, γ) o captura radiactiva: El núcleo compuesto emite su exceso de energía en forma de radiación gamma. Este tipo de reacción produce la pérdida de un neutrón en el sistema; es posible para cualquier energía del neutrón incidente.

Para ciertos valores de energía la probabilidad de que un neutrón incidente sea capturado y forme un núcleo compuesto es excepcionalmente grande; éste fenómeno recibe el nombre de resonancia. Para elementos de número másico moderado y alto, la absorción resonante ocurre con neutrones de energía de 1 eV a 10 eV.

Reacciones de fisión

Es un proceso competitivo con la captura; se produce exclusivamente con ciertos núcleos de números atómicos y másicos altos, y un núcleo de este tipo, sometido a un bombardeo de neutrones se escinde en dos fragmentos o núcleos producidos.

Existen sólo tres nucleídos con estabilidad suficiente para ser almacenados largo tiempo que son fisionables por neutrones de cualquier energía (U^{233} , U^{235} y Pu^{239}) estos nucleídos se llaman físiles.

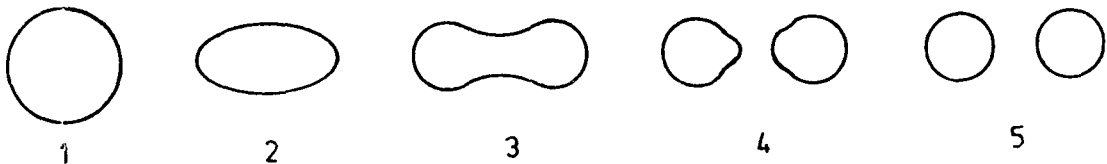
Existen nucleídos que son fisionables exclusivamente por neutrones rápidos (torio 232 , U^{238}) se los denomina nucleídos fisionables. Dado que Th^{232} y U^{238} pueden convertirse por captura neutrónica en especies físiles U^{233} y Pu^{239} se los denomina fértiles.

Este fenómeno va acompañado de una liberación de neutrones con energías que van desde menos que 1eV hasta alrededor de los 10 Mev.

Los productos de fisión son inestables y altamente radiactivos decayendo por emisión β y γ .

Algunas características del proceso de fisión pueden estudiarse mediante el modelo de la gota líquida. En esta forma de la gota depende del balance entre las fuerzas de tensión superficial y las fuerzas repulsivas de Coulomb. Si se agrega energía a la gota, por ejemplo por medio de la energía de excitación resultante de la captura de un neutrón lento, se producen oscilaciones dentro de la gota que tienden a distorsionar su forma esférica y la gota puede convertirse en elipsoidal.

Las fuerzas de tensión superficial tienden a hacer retornar a la gota a su forma original mientras la energía de excitación tiende a distorsionar aún más la forma. Si la energía de excitación es suficientemente grande, la gota puede alcanzar la forma similar a la fig. (3). Las fuerzas repulsivas de Coulomb pueden producir la separación en dos gotas similares de forma esférica.



Si la energía de excitación no es suficientemente grande, el elipsoide puede retornar a su forma esférica y liberar la energía de excitación en forma de rayos γ y entonces el proceso es una captura radiactiva en vez de una fisión. Una reacción en cadena autosustentada, sólo es probable con nucleídos físiles.

Reacción (n, part.cargada): El núcleo compuesto decae por emisión de una partícula cargada, las reacciones más frecuentes son (n,p) y (n, α).

Las reacciones de este tipo son importantes para núcleos livianos. Para núcleos pesados y medios, si bien son energéticamente posibles, están inhibidas por la barrera de Coulomb por lo tanto no son importantes para neutrones de energía inferior a 10 Mev.

Secciones eficaces en función de la energía de los neutrones incidentes.

La interacción elástica consta en general de dos componentes debidas: 1) a la dispersión potencial y 2) a la dispersión por núcleo compuesto.

La sección eficaz debida a la primera componente varía desde $4\pi R^2$ para energías incidentes bajas, hasta πR^2 para energías altas; (R es el radio nuclear); además para una dada energía del neutrón incidente varía con el número de masa. La componente de la sección eficaz debida al núcleo compuesto muestra comportamiento resonante para núcleos de A bajos en la región de los Mev y para núcleos de A alto en la región de eV-100 eV. Esto se debe a la probabilidad de resonancia de los núcleos compuestos. A energías altas la dispersión elástica compuesta es despreciable para todos los núcleos.

Distribución angular y de energía del neutrón emitido.

Existe una relación entre la distribución angular y de energía del neutrón emitido, esta relación puede deducirse de la conservación de la energía y la cantidad de movimiento en un choque perfectamente elástico.

Si E_0 es la energía inicial del neutrón, E su energía luego de la dispersión y ϕ el ángulo de dispersión en el sistema centro de masa, entonces

$$E = \frac{A^2 + 1 + 2 A \cos \phi}{(A + 1)^2} E_0$$

Donde A es la masa relativa del núcleo dispersor con respecto a la masa del neutrón.

La relación entre el ángulo de dispersión en el sistema centro de masa ϕ y el ángulo de dispersión en el sistema del laboratorio θ es:

$$\cos \theta = \frac{A \cos \phi + 1}{(A^2 + 1 + 2A \cos \phi)^{1/2}}$$

En general la dispersión es isotrópica en el sistema centro de masa para energías incidentes bajas (menores de 0,1 - 0,5 Mev) excepto para el hidrógeno en que se mantiene isotrópica para energías incidentes de hasta 15 Mev.

A medida que aumenta la energía del neutrón incidente la dispersión se distribuye teniendo un pico hacia adelante que es máximo para $\cos \phi = 1$ y a una energía de 10 Mev; a su vez existe el máximo correspondiente de la distribución angular en el sistema de laboratorio; la diferencia entre los dos sistemas se hace despreciable cuando A es muy grande, y para valores pequeños de A , las diferencias entre el sistema centro de masa y laboratorio, a pesar de ser significativas, pueden ser menores que los errores experimentales, excepto para A menores que 10.

Para $A > 1$: $\cos \phi = 1$ corresponde $\cos \theta = 1$ y para $\cos \phi = -1$ corresponde $\cos \theta = -1$. En el caso de hidrógeno no donde $A = 1$ si $\cos \phi = 1$ corresponde $\cos \theta = 0$ lo que significa que cuando el núcleo blanco es hidrógeno los neutrones sólo pueden dispersarse en el sistema de laboratorio entre $\theta = 0$ y $\theta = \pi/2$, o sea no hay retrodispersión.

Cuando todos los valores de $\cos \phi$ son igualmente probables, la distribución de energía del neutrón emitido es rectangular entre la energía incidente

E_0 y $\left(\frac{A-1}{A+1}\right)^2 E_0$, en ese rango de energías del neutrón

emergente, la probabilidad de que el neutrón emergente tenga su energía entre E y $E + dE$ es

$\frac{(A+1)^2}{4A} dE$ en ese rango y cero fuera de él.

La moderación es más rápida cuanto más pequeño es el valor de A . El núcleo blanco más efectivo es el hidrógeno.

Reacción (n,n')

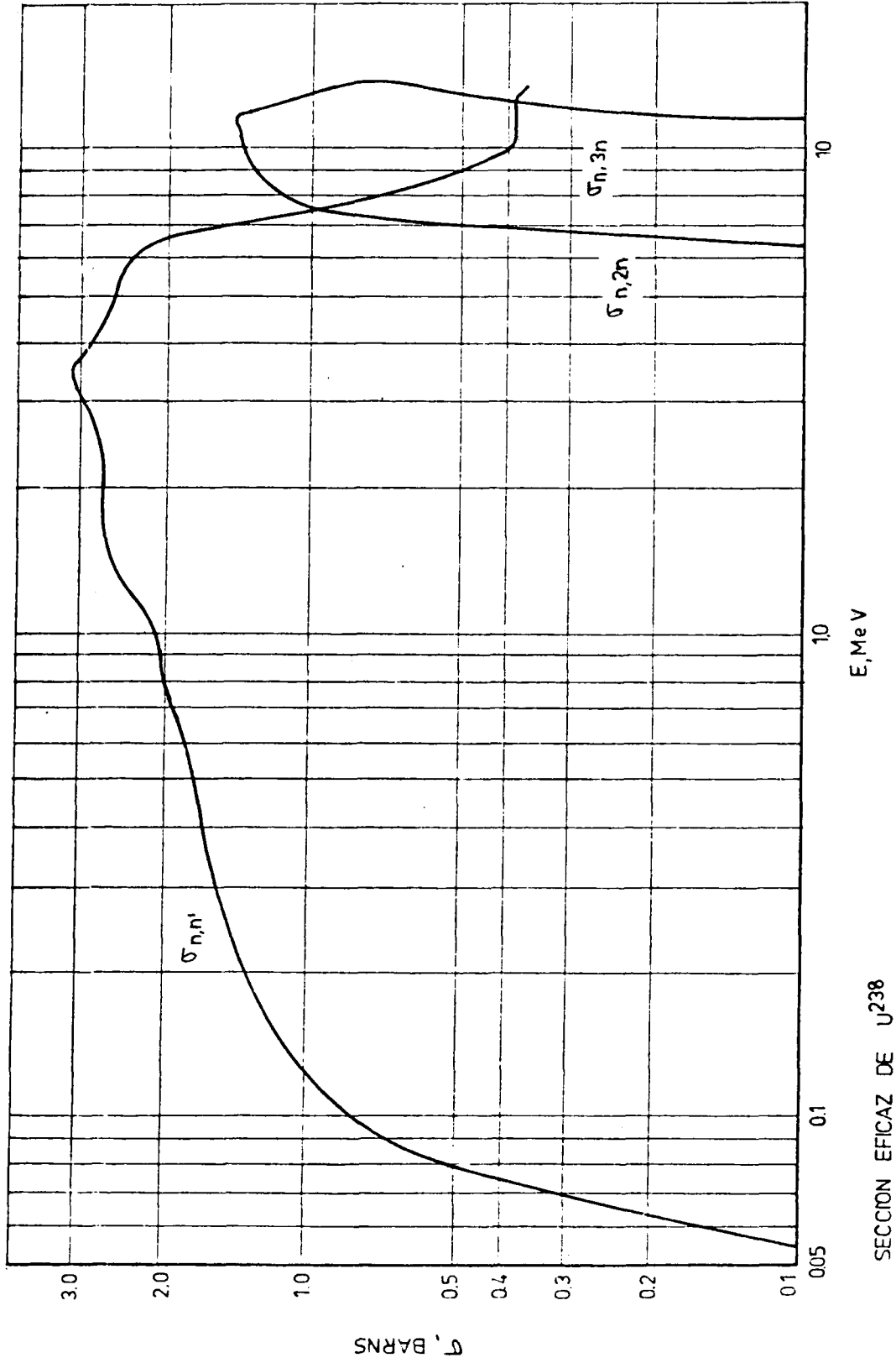
Sólo se producen cuando el neutrón incidente tiene energía suficiente como para excitar el primer nivel de energía del núcleo blanco, esto determina la existencia de una energía umbral para la reacción; en general es de pocos Mev para núcleos livianos hasta 10-50 Kev para núcleos pesados.

La sección eficaz aumenta rápidamente desde el umbral, si no existe competencia, la sección eficaz aumenta luego de una serie de máximos y mínimos, hasta el valor de la sección eficaz total no elástica que es aproximadamente $\pi (R + \lambda)^2$.

Si la reacción (n,2n) es energéticamente posible la sección eficaz aumenta con la energía a expensas de la sección de (n,n') que tiende a disminuir, pero $\sigma (n,n')$ no tiende a cero como se deduciría de la teoría del núcleo compuesto porque parte de la reacción se produce por mecanismo directo de interacción y la sección eficaz de esta reacción, para núcleos pesados, es aproximadamente 1/5 barn, en la región de 14 Mev.

Los niveles de energía en núcleos livianos están separados por 0,5-5 Mev, con lo cual sólo están disponibles para la excitación algunos niveles, entonces la energía y distribución angular del neutrón emergente son características del nivel excitado. Para núcleos medios y pesados, donde los niveles de energía están muy cercanos, el núcleo producto puede quedar en cualquier estado excitado y cómo se está interesado en el efecto promedio, resulta una distribución angular simétrica alrededor de 90° , en el sistema centro de masa. O sea para fines prácticos la distribución angular de neutrones emergentes de la reacción (n,n') para núcleos medios y pesados, puede considerarse como isotrópica, a excepción de la componente de la reacción (n,n') que queda a energías altas, luego que se produjo la reacción (n,2n), debido a procesos de interacción directa que da como resul

tado una dispersión de neutrones hacia adelante con poca pérdida de energía.



SECCION EFICAZ DE U^{238}

Reacción (n,2n)

Generalmente el umbral para esta reacción está en la región 6-10 Mev.

La sección eficaz crece desde su umbral a expensas de $\sigma(n,n')$.

En ausencia de competición con las reacciones (n,3n) o (n,f) $\sigma(n,2n) \rightarrow \sigma_C \rightarrow \pi(R + \lambda)^2$ para neutrones incidentes de alta energía.

La distribución de energía de los neutrones emitidos es más complicada que en el caso de la reacción (n,n'), sin embargo para energías de neutrones incidentes considerablemente superior que la energía umbral puede representarse el espectro de los neutrones emitidos por una distribución de tipo maxwelliano con un valor de Γ elegido convenientemente. Los aspectos esenciales del espectro son: en general de una energía de emisión más probable en la región de 1/4 - 1 Mev y que son en mayor o menor grado de forma maxwelliana. Para todos los propósitos básicos la distribución angular de los neutrones emitidos es isotrópica en el sistema centro de masa.

Reacción (n,3n)

Es una reacción que necesita una energía umbral alta (> 10 Mev), por lo que no es muy importante desde el punto de vista de la criticidad.

La sección eficaz crece desde su umbral de una forma similar a la sección eficaz (n,2n) y aumenta a expensas de ésta última. La energía de emisión más probable está en la región 1/4 - 1 Mev y los neutrones son emitidos más o menos isotrópicamente en el sistema centro de masa.

Reacción de fisión

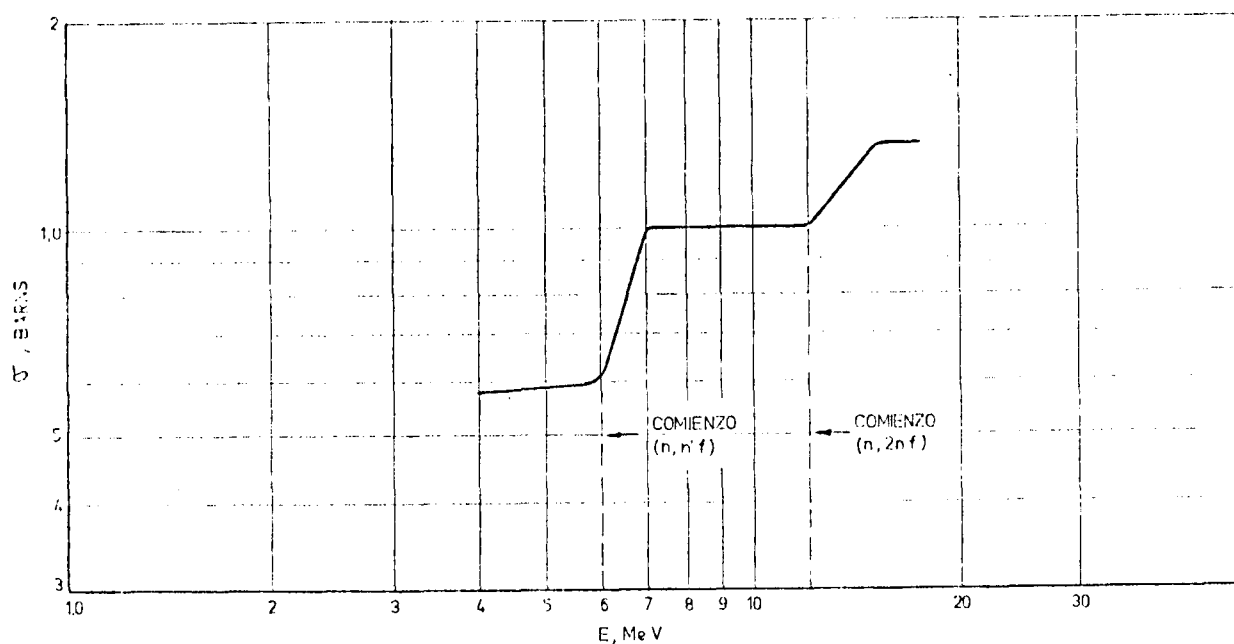
Se considerará en particular los tres núcleos de más interés con respecto a la fisión: Pu^{239} , U^{235} y U^{238} . Pu^{239} y U^{235} son físi^les térmicamente; U^{238} no es térmicamente físi^l y el umbral de energía para fisión es de alrededor 0,9 Mev.

Las secciones eficaces de fisión de U^{235} y Pu^{239} son muy grandes a energías térmicas, decreciendo luego con la ley $1/v$ a medida que la energía del neutrón incidente aumenta y muestran un fuerte comportamiento resonante y hay un gran número de resonancias entre ~ 1 eV y ~ 100 eV. En aproximadamente 1 Mev la sección eficaz tiene una disminución a $\sim 1,25$ y 2 barns respectivamente. Las secciones eficaces para todos los isótopos físi^les son similares. La sección eficaz de fisión es prácticamente constante para neutrones incidentes de energía entre ~ 1 a ~ 6 Mev. En la región de 6 Mev hay suficiente energía disponible como para que la fisión del núcleo compuesto sea precedida por la emisión de un neutrón. Algo similar ocurre si la energía es mayor que 12 Mev; la energía incidente es suficiente para producir una reacción (n,2nf); el comienzo de este proceso da una segunda chance de fisión al núcleo, la primera es por la fisión de primer orden (n,f); el comienzo del proceso de fisión adicional se evidencia por un aumento brusco de la sección eficaz de fisión para energías

algo mayores que la energía umbral de la reacción, luego la sección eficaz es prácticamente constante.

En todos los casos la reacción de fisión es competitiva con las reacciones (n,n') y/o $(n,2n)$ y/o $(n,3n)$.

La sección eficaz total para la suma de esos procesos está dada por $\pi (R + \lambda)^2$ para altas energías y aún considerando los procesos $(n,n'f)$ y $(n,2nf)$ la sección eficaz total tiene un límite superior de aproximadamente $\pi (R + \lambda)^2$.



SECCION EFICAZ DE FISION DEL U^{235}

Es una reacción posible cualquiera sea la energía del neutrón incidente, esto hace que compita desfavorablemente con toda forma de decaimiento del núcleo compuesto excepto para neutrones incidentes de energía muy baja.

La sección eficaz de la reacción (n,γ) presenta grandes variaciones para distintos núcleos en la zona de las energías térmica y epitérmica debido al comportamiento resonante de algunos núcleos.

Un ejemplo notable es el Cadmio que tiene una sección eficaz de 2400 barns para energías térmicas y cae aproximadamente a 1 barn en la región de 1 eV. Debido a su gran sección eficaz de absorción; el Cadmio es de considerable importancia en la prevención de la criticidad.

La sección eficaz (n, γ) de algunos núcleos entre ellas U^{238} muestra muchas resonancias hasta una energía de 100 eV. Para núcleos en los cuales la primera resonancia está relativamente lejos de las energías térmicas, la sección eficaz varía en función inversa de la velocidad esto se conoce como la ley $1/v$. A energías intermedias donde se superponen muchas resonancias el efecto total de superposición produce una variación $1/v$ en la sección eficaz que a altas energías da lugar a una variación de la forma $1/E$. Sin embargo, la sección eficaz no continúa disminuyendo de esa forma indefinidamente, sino que tiende a ser bastante pequeña pero constante.

Reacción (n , partícula cargada)

Las reacciones importantes en el estudio de criticidad son las (n, p) y (n, α). Estas reacciones aunque tengan un valor de Q positivo están inhibidas por la barrera de Coulomb que tiene que ser penetrada por las partículas para escapar desde el núcleo compuesto.

Las reacciones con partículas cargadas que son más importantes desde el punto de vista de criticidad son:

Reacción	Valor Q (Mev)	Sección eficaz a $\frac{1}{40}$ eV(barn)
$He^3 (n, p) H^3$	0.77	5500
$Li^6 (n, \alpha) H^3$	4.79	945
$B^{10} (n, \alpha) Li^6$	2.79	3800

Las secciones eficaces de las reacciones anteriores disminuyen con la energía del neutrón de la forma $1/v$ hasta la región del Mev, donde muestra algunos comportamientos de resonancia simple, particularmente $Li^6 (n, \alpha)$ y $B^{10} (n, \alpha)$.

La reacción de más importancia práctica es $B^{10} (n, \alpha)$ ya que el B^{10} (o boro natural) puede incorporarse a un sistema para absorber neutrones; tiene ventaja sobre el cadmio porque su sección eficaz no exhibe una caída a bajas energías, por lo tanto el B^{10} continúa absorbiendo neutrones térmicos tan bien como neutrones de energías altas.

Secciones eficaces térmicas:

Se van a hacer unas pocas consideraciones acerca de los valores de las secciones eficaces a energía térmica para compuestos químicos.

A energías por debajo del eV las fuerzas de unión química comienzan a tener efecto sobre la dispersión de neutrones por las moléculas. Estos efectos se manifiestan en varias formas si ocurre una dispersión inelástica por la molécula, un núcleo de hidrógeno, dentro de la molécula se comporta como si tuviera un aumento de masa; los efectos de unión también hacen que la sección eficaz sea mayor que la suma de las de los núcleos libres, entonces a energías por debajo de 1 eV

la sección eficaz total de una molécula de agua, por ejemplo, es mayor que la suma de las secciones eficaces de los núcleos separados, o sea:

$$\sigma_{\text{H}_2\text{O}} > (2\sigma_{\text{H}} + \sigma_{\text{O}})$$

La interacción entre las moléculas en un sólido también afecta las secciones eficaces. En la práctica, sin embargo, se pueden evitar esas dificultades usando constantes térmicas (promedios sobre un espectro térmico) determinadas experimentalmente para la sustancia en cuestión.

Constantes de grupo

A los fines del cálculo a menudo es útil, reducir las secciones eficaces a constantes de grupo. En la aproximación de constante de grupo se considera un número finito de grupos de energías (hasta 30) y se calculan las posibles secciones eficaces promedio y secciones de transferencia entre los distintos núcleos. En algunos casos, las constantes de grupo pueden obtenerse directamente de experiencias de tipo integral.

III.1.2 Sistemas críticos

Definición de sistemas críticos

Para estudiar sistemas constituidos por materiales fisionables es necesario hacer un balance neutrónico y en función de ello se define:

Sistema crítico: La población neutrónica es constante o sea que la producción de neutrones está exactamente balanceada por la captura y el escape.

Sistema supercrítico: la población neutrónica crece en el tiempo o sea la producción es mayor que la captura más el escape.

Sistema subcrítico: la población neutrónica tiende a disminuir en el tiempo o sea la producción es menor que el escape más la captura.

La influencia de distintos parámetros sobre el estado crítico de un sistema puede verse de modo intuitivo, considerando una esfera de uranio metálico enriquecido al 93 % de densidad normal y en estado crítico.

El diámetro de esa esfera es de 17,5 cm, el volumen es de 2,8 l. y la masa total es 52 kg aproximadamente. Si a esa misma cantidad de material se le da forma cilíndrica las distancias que deben atravesar los neutrones para alcanzar las fronteras del sistema luego de dispersarse son menores y por lo tanto la probabilidad de que un neutrón escape del sistema aumenta. En otras palabras, la pérdida aumenta a expensas de la fisión y la captura dando por resultado que la nueva forma es subcrítica.

Volviendo a la esfera, si se mantienen, la forma y las dimensiones pero se disminuye la densidad y por lo tanto la masa del U(93), los neutrones atraviesan en su camino hacia la superficie menos material, la posibilidad de pérdida aumenta y la nueva esfera será subcrítica.

Si la esfera se sumerge en agua, algunos neutrones que de otro modo escaparían de la superficie son retro-dispersados hacia el material fisible, disminuye la pérdida y la esfera es supercrítica. En esta situación, el diámetro crítico es 13,4 cm.

Si en lugar de rodear la esfera con agua se mezcla agua homogéneamente con el U(93), a medida que aumenta la cantidad de agua cambia el estado del sistema. Cuando el volumen de agua en la mezcla, no es mucho mayor que el de uranio, el efecto moderador del agua no es lo suficientemente grande como para compensar el efecto del aumento de la captura y la reducción de la densidad del uranio; las colisiones con hidrógeno son pocas como para que la moderación de los neutrones sea significativa; en consecuencia la cantidad de uranio que era crítica sin dilución ahora es subcrítica. Al aumentar la dilución aumenta el efecto de moderación y el sistema se acerca al estado crítico hasta que el volumen de agua es a-

proximadamente 350 veces el de uranio, donde se compensa la captura de neutrones con el efecto adicional de moderación; aquí el diámetro crítico de la esfera sin reflector es de 38 cm y el volumen 30 l, pero la masa de U^{235} es de sólo 1.4 kg..

Si se agrega un reflector completo de agua a la esfera reduce esos valores a 30 cm de diámetro, 16 l. de volumen y 0.8 kg. de U^{235} . Estas condiciones representan la mínima masa crítica de U^{235} que puede encontrarse en procesos habituales.

Parámetros que afectan la criticidad en un sistema

Masa: a mayor cantidad de átomos fisionables es mayor la probabilidad de que un neutrón interaccione con un núcleo físil y comience una reacción en cadena.

Densidad: A mayor densidad es mayor el número de átomos por unidad de volumen por lo que la probabilidad de interacción del neutrón con los núcleos físi- les es mayor.

Geometría: La forma del sistema determina la relación superficie-volumen del mismo y cuanto mayor es la superficie, mayor es la pérdida de neutrones que experimenta el sistema.

Interacción: Si se ubican dos o más unidades subcríticas juntas, los neutrones que escapan de una unidad puede penetrar en otra aumentando así el balance neutrónico.

Moderación: Los neutrones de fisión se generan con gran energía, pero la probabilidad de producir nuevas fisiones es mucho mayor a energías térmicas, los neutrones son termalizados por colisiones con los núcleos livianos por lo tanto una buena moderación aumenta la reactividad del sistema.

Envenenamiento: Los neutrones, en especial los térmicos, son capturados por átomos de veneno (B,Cd) y se pierden para la reacción en cadena. Átomos como H, N, metales y U^{238} actúan hasta cierto punto como venenos. La presencia de estos venenos aumenta la captura a expensas de la fisión.

Concentración: Esta es una consecuencia de los dos últimos parámetros. En soluciones que contienen hidrógeno, éste actúa como moderador y como veneno. Una dilución limitada aumenta la reactividad como consecuencia del aumento de la moderación, en soluciones muy diluidas el efecto de veneno del hidrógeno hace imposible la reacción en cadena.

Reflexión: Si los neutrones que escapan de un sistema son devueltos por un reflector, éstos vuelven más o menos termalizados aumentando la reactividad. Un sistema seguro en aire, puede ser crítico si se lo sumerge en agua, algo similar ocurre cuando hay unidades que pueden interaccionar entre sí por estar próximas.

Inversamente, grandes espesores de agua puede actuar como blindaje.

Enriquecimiento: La presencia de U^{238} con U^{235} tiene diversos efectos sobre la reactividad; en algunos aspectos la aumenta (fisión rápida, reflexión) y en otros la decrece (especialmente envenenamiento, captura por resonancia). En general, puede decirse que un aumento del enriquecimiento, provoca un aumento de la reactividad.

Heterogeneidad: En general, la masa crítica de un material físil asociado con un moderador es mínima cuando los dos están íntimamente mezclados como por ejemplo en una solución acuosa. Pero cuando el enriquecimiento es muy bajo (menores del 5 %) la masa crítica de un conjunto heterogéneo es menor que la masa crítica de un sistema homogéneo en las mismas condiciones.

Temperatura: La temperatura modifica las propiedades intrínsecas de difusión y sobre todo de absorción de lo que se deduce que influye sobre el balance neutrónico.

CRITERIOS PARA EL ANÁLISIS DE ESTADOS CRÍTICOS: Existen dos criterios básicos para el análisis de estados críticos: por medio del factor de multiplicación superficial y por medio del coeficiente de multiplicación definido en la teoría de reactores.

Factor de multiplicación superficial:

Se define como el número probable de neutrones que abandonan el núcleo como resultado de un neutrón que entra en él (M_S).

Fisión y multiplicación:

El hecho que en una fisión se emitan más neutrones que los que se absorben hace posible la existencia de una reacción en cadena en un medio que contiene materiales fíviles; tal medio será llamado multiplicador. Sólo las fisiones inducidas juegan un papel importante en la reacción en cadena ya que las fisiones espontáneas no hacen más que iniciarlas.

Noción de k_∞ de un medio multiplicador

Se considera un medio multiplicador ficticio infinito en la práctica podrá ser un recipiente de dimensiones grandes conteniendo por ejemplo una solución de uranio o plutonio.

Se considera en un instante dado n_1 neutrones que salen en el mismo instante de la fisión; el problema reside en saber cuántos neutrones nuevos, o sea n_2 , nacerán de fisiones ulteriores provocadas por esos n_1 neutrones.

La relación n_2/n_1 , se define como coeficiente de multiplicación k_∞ si cada neutrón naciente provoca una nueva fisión, esa relación será simplemente igual al número medio de neutrones producidos en una fisión, llamado ν . El neutrón puede ser absorbido por ciertos núcleos del medio antes de provocar una fisión y en consecuencia el coeficiente de multiplicación es siem-

pre netamente inferior a ν .

Los n_2 neutrones nacientes producirán a su vez n_3 neutrones y así sucesivamente; se puede expresar

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{n_3}{n_2} = \frac{n_4}{n_3} = \dots = k_{\infty}$$

Nótese que n_j y n_{j+1} se refieren a neutrones de dos generaciones sucesivas.

Si $k_{\infty} > 1$ la reacción en cadena se va a desarrollar hasta que la detenga algún fenómeno físico. El medio es supercrítico.

Si $k_{\infty} = 1$ la reacción en cadena se mantendrá dando una población neutrónica estable; el medio es crítico.

Si $k_{\infty} < 1$ la reacción en cadena no puede mantenerse y el medio es subcrítico.

De dos medios distintos, el que tiene coeficiente de multiplicación más grande es el más reactivo.

Fórmula de los cuatro factores

Esta fórmula resume la influencia sobre el k_{∞} de los fenómenos de absorción, producción por fisión y captura.

Si se considera un medio multiplicador infinito, con un moderador, el esquema permite seguir la evolución de n_1 neutrones que nacen de fisiones hasta la producción de una nueva generación n_2 de neutrones.

NEUTRONES QUE PERMANECEN
EN LA CADENA

I n_1 neutrones nacientes

II $n_1 p$ neutrones térmicos no capturados durante su moderación.

III $n_1 p f$ neutrones térmicos absorbidos por los núcleos físiles.

IV $n_1 p f \frac{\eta}{\nu}$ neutrones térmicos absorbidos por los núcleos físiles para producir fisión.

V $n_1 p f \frac{\eta}{\nu}$ neutrones nacientes de fisiones inducidas por los neutrones térmicos.

VI $n_1 p f \eta \epsilon = n_2$ neutrones nacientes de todas las fisiones inducidas por neutrones térmicos y rápidos.

NEUTRONES PERDIDOS
POR LA CADENA

IIA $n_1 (1-p)$ neutrones capturados durante su moderación.

IIIA $n_1 p (1-f)$ neutrones térmicos capturados por los núcleos no físiles (moderadores venenos)

IV-A $n_1 p f (1-\frac{\eta}{\nu})$ neutrones térmicos capturados por los núcleos físiles.

$$\frac{n_2}{n_1} = K_{\infty} = \eta \epsilon p f$$

Al pasar del grupo I al grupo II: p representa la probabilidad de los neutrones de escapar a las trampas es el factor anti-trampa.

Al pasar del grupo II al grupo III: f representa la probabilidad para los neutrones térmicos de ser absorbidos por un núcleo fisible frente a los otros núcleos: es la utilización térmica.

Del grupo III a los grupos IV y V: ν es el número medio de neutrones producidos en una fisión, mientras η es el número medio de neutrones producido por un neutrón absorbido por un núcleo fisible; $\frac{\eta}{\nu}$ representa también la probabilidad para un neutrón térmico absorbido en un núcleo fisible de producir una fisión.

Del grupo V al grupo VI: ϵ es el factor de fisión rápida; los neutrones de alta energía tienen una cierta probabilidad de inducir fisiones ϵ es un factor correctivo ligeramente mayor que 1 que tiene en cuenta globalmente este efecto.

Factor de multiplicación efectivo k_{ef}

Se utiliza cuando se trabaja con medios finitos; estos introducen una nueva causa muy importante de pérdida de neutrones en el balance neutrónico que son las posibles fugas a través de los límites del material fisible.

Si un medio multiplicador finito está rodeado de vacío (en la práctica, aire) todo neutrón que franquee la frontera se pierde irremediablemente para la reacción en cadena ya que no encontrará núcleos susceptibles de dispersarlo hacia el medio original. Si se encuentra con un medio como agua o metal, ahora el neutrón tendrá una cierta probabilidad de ser dispersado hacia el medio original, pero no es más que una probabilidad y no una certeza. En todos los casos las fronteras introducen pérdidas de neutrones.

Se considera en un instante dado, un medio multiplicador de una dada geometría, nacerán, n_1 neutrones en el mismo instante de la fisión y habrá n_2 neutrones nacientes de fisiones ulteriores provocadas por esos n_1 neutrones. El coeficiente de multiplicación efectiva, k_{ef} , es por definición:

$$k_{ef} = \frac{n_2'}{n_1}$$

Si se producen pérdidas de neutrones a través de las fronteras, se puede definir para el recipiente y el medio dados una probabilidad de no fuga del sistema entre el tiempo de nacimiento y absorción de los neutrones; esta probabilidad se denomina probabilidad de Permanencia P .

$$p = \frac{n_2'}{n_2}$$

Entonces $k_{ef} = \eta \epsilon f_p P = k_{\infty} \cdot P$

En la práctica los factores η , ϵ , f y p no dependen del recipiente.

En resumen: el k efectivo de un medio finito es igual al producto de dos factores; uno de ellos es una propiedad intrínseca del medio y depende sólo de su composición y es el k_{∞} ; el otro depende a la vez de la composición y de la geometría; es la probabilidad de permanencia P .

Se dice entonces que:

Si $k_{ef} > 1$ el medio es supercrítico.

Si $k_{ef} = 1$ el medio es crítico.

Si $k_{ef} < 1$ el medio es subcrítico.

Se dice que de dos medios diferentes el más reactivo es el que tiene k_{ef} más grande.

Criterios para la determinación del tamaño crítico

Si se considera un neutrón presente en un sistema, existe una cierta probabilidad que interactúe en una determinada distancia; además hay una probabilidad de que el resultado sea una absorción, dispersión o fisión. A su vez esos resultados introducirán probabilidades respecto al número, distribución angular y de energía de los neutrones resultantes de la interacción.

El comportamiento de los neutrones en un determinado medio es estadístico, gobernado por las leyes de probabilidad. En el estudio de criticidad, el número de neutrones involucrados en una reacción debe ser muy grande (mayor de 10^{15}) para que se detecte algún efecto; por lo tanto puede representarse el comportamiento de la población neutrónica ignorando las fluctuaciones estadísticas. Esto es aplicable cuando hay un gran número de neutrones, de lo contrario hay que tener en cuenta las fluctuaciones estadísticas, como en el caso del comienzo de una reacción o bajo ciertas condiciones experimentales.

Otra consideración que simplifica el tratamiento es que puede ignorarse la posibilidad de interacciones neutrón-neutrón; es decir que cada neutrón se comporta como si no existiesen otros neutrones. Esto se justifica por el hecho de que el número de neutrones en un sistema es siempre despreciable comparado con el número de núcleos blancos.

Autodistribución

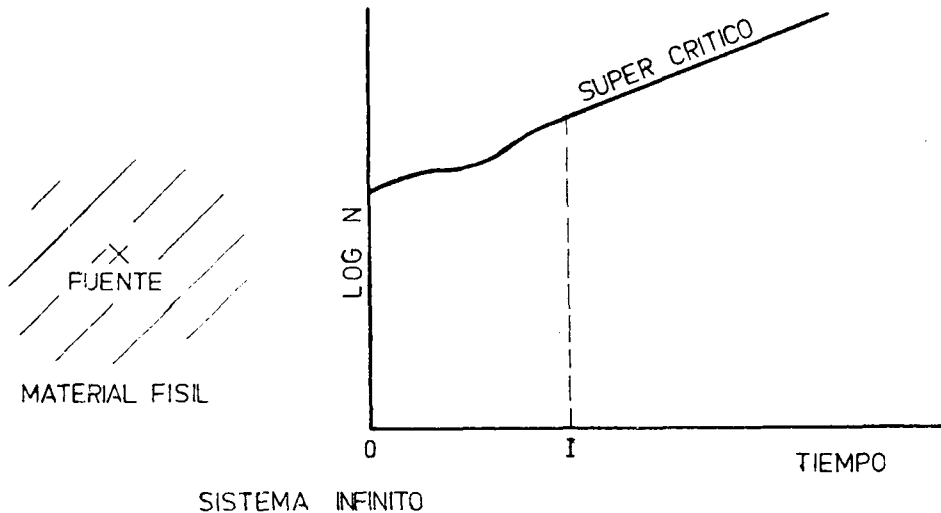
Cuando comienza a establecerse una autodistribución en un sistema crítico, la distribución de neutrones en todo punto del sistema permanece constante; eso significa que el número de neutrones que se mueven en cualquier dirección y con cualquier energía no cambia en el tiempo. En sistemas supercríticos o subcríticos el número total de neutrones aumentará o disminuirá exponencialmente pero sin alterar el número relativo de neutrones en cualquiera de los puntos seleccionados en el sistema. Por ejemplo si en un instante hay en un punto el doble de neutrones, de una dada energía y dirección que en otro punto con otra energía y dirección esa relación de dos se mantiene en el tiempo.

Efecto de límites y reflectores

El efecto de límites y reflectores sobre el comportamiento de los neutrones en un sistema puede ilustrarse representando el logaritmo del número de neutrones presentes ($\log N$) en función del tiempo, considerando un gran número de neutrones al tiempo cero para excluir fluctuaciones estadísticas. Es necesario considerar la forma de esta curva, primero para un sistema infinito y después con el agregado de un límite y por último de un reflector.

Sistema infinito:

En un sistema infinito, se considera una fuente puntual en el centro de una masa infinita de material fisionable que genera instantáneamente un gran número de neutrones a tiempo cero. Existen algunas fluctuaciones iniciales hasta que el espectro de energía de los neutrones alcance una distribución de equilibrio (autodistribución) en el tiempo I. Una vez establecida la autodistribución la curva se convierte en una línea recta y su pendiente dependerá del estado del sistema; será positiva si el sistema es supercrítico, negativa si es subcrítico y cero si es crítico.

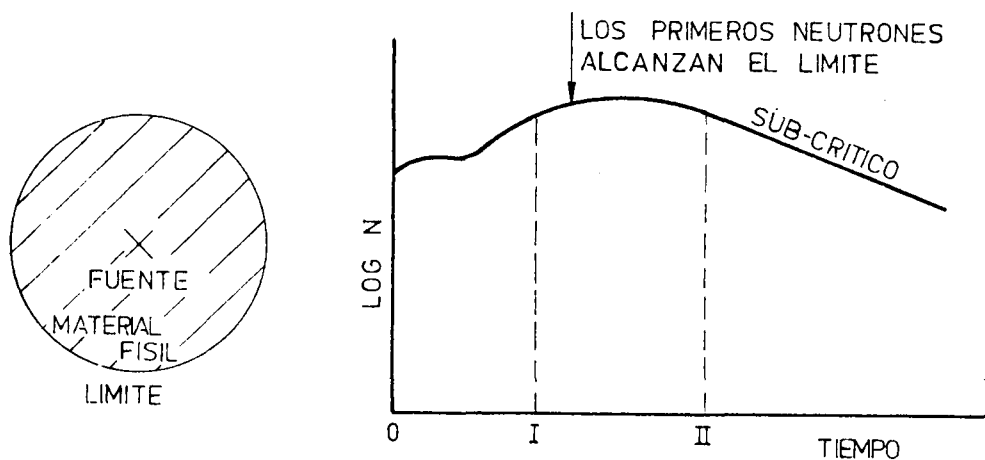


Sistema limitado

En un sistema limitado el comportamiento será el mismo que en un sistema infinito, hasta que los primeros neutrones alcancen el contorno, pero en lugar de continuar aumentando uniformemente $\log N$ tiende ahora a caer a medida que los neutrones comienzan a escapar del sistema a través del límite. Esta caída aumentará a medida que un mayor número de neutrones alcancen el límite, hasta que se establezca una nueva autodistribución en el tiempo II. La nueva autodistribución es una distribución de equilibrio.

La curva será nuevamente una recta y tendrá una pendiente menor que para un sistema infinito, pudiendo en el

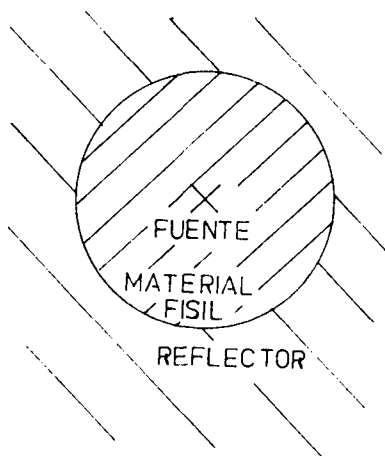
caso de ser un sistema supercrítico infinito convertirse en un sistema finito subcrítico o crítico.

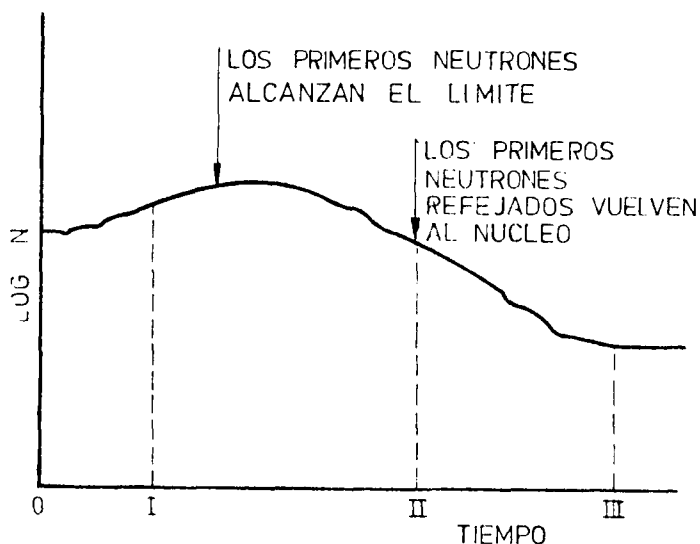


SISTEMA LIMITADO

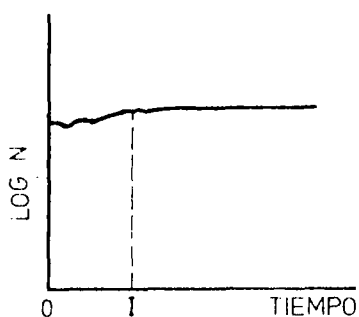
Sistema reflejado

Un sistema reflejado puede estudiarse de la misma forma que un sistema finito; los neutrones se comportan inicialmente como en un sistema infinito hasta que los primeros neutrones alcancen los límites y luego como un sistema finito hasta que los primeros neutrones retornen desde el reflector. El resultado es que algunos de los neutrones que escapaban, ahora son devueltos al núcleo. Las distribuciones espacial y de energía son ahora perturbadas y existen fluctuaciones hasta que se establece una nueva autodistribución en el tiempo III y la curva se convierte nuevamente en una línea recta.





En un sistema real reflejado en el que el estado no es altamente supercrítico no existe una separación notable entre los tiempos I, II y III y la curva de $\log N$ en función del tiempo tendrá fluctuaciones iniciales seguidas por una línea recta una vez establecida la autodistribución.



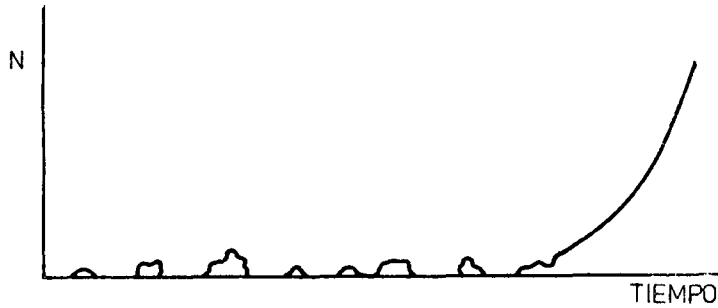
Importancia de límites y reflectores

Para resumir la importancia en criticidad de límites y reflectores se ve que cuando el sistema que se discutía era infinito se trataba de un sistema supercrítico, el agregado de un límite lo puede hacer subcrítico y el agregado de un reflector lo puede convertir en crítico.

Al fijar el estado de un sistema es importante examinar las condiciones en el límite entre el núcleo y el reflector y si se tiene una información completa del comportamiento de los neutrones en esa interfase no es necesario considerar las condiciones en el resto del sistema para poder definir su estado.

Iniciación de una excursión supercrítica

Si se grafica la población neutrónica de un sistema que inicia una excursión supercrítica en función del tiempo se obtiene una curva del tipo:



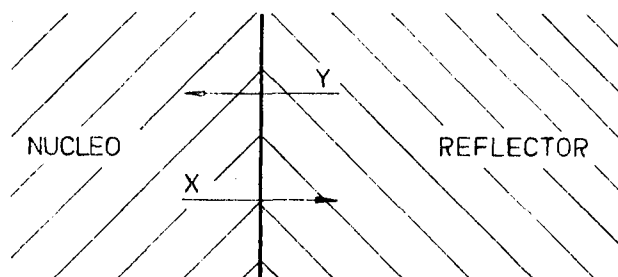
INICIACION DE UNA REACCION EN UN SISTEMA SUPER CRITICO

Los neutrones aparecen en el sistema espontáneamente y la mayoría desaparece rápidamente antes que se establezca una reacción en cadena continua. El lapso de tiempo para establecer una reacción en cadena continua, en el caso de U^{235} , puede ser de varios minutos.

Multiplicación y reflexión

Condiciones de criticidad en términos de multiplicación y reflexión.

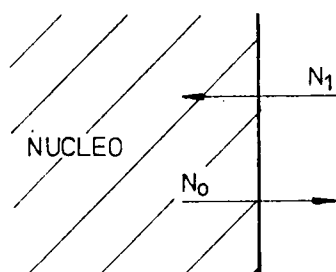
Para deducir el estado crítico de un sistema a partir de las condiciones de borde del núcleo, se necesita conocer una estimación de los neutrones que atraviesan el borde tanto al abandonar el núcleo como al retornar a él desde el reflector.



En la figura I se esquematiza el límite de un sistema en el cual se ha establecido la autodistribución, y los valores de salida y reingreso de neutrones al núcleo están dadas por X e Y respectivamente ambas determinadas en un mismo instante.

Para establecer si el sistema es crítico se necesita considerar las relaciones X/Y e Y/X y compararlas con los parámetros "multiplicación superficial" y "reflexión" que tienen valores definidos para un dado sistema.

Multiplicación superficial



En la figura II se considera la interfase de la figura I sin reflector.

Se supone que un número N_1 de neutrones con la misma distribución angular y de energía que Y penetran en el núcleo dando como resultado N_0 neutrones que lo abandonan.

Entonces $\frac{N_0}{N_1} = M_S$ donde M_S es la multiplicación superficial a menudo llamada también M .

M_S también se define como el número probable de neutrones que abandonan el núcleo como resultado de un neutrón que entra en él.

En el sistema completo de núcleo más reflector, la relación de X e Y no será igual a la multiplicación superficial M_S del núcleo, a menos que X e Y permanezcan constantes en el tiempo, o sea que el sistema sea crítico.

Esto se debe a que los neutrones emergentes son el resultado de un número de neutrones no necesariamente igual a los Y que penetran. Si ese número era inferior que Y entonces es el caso de un sistema supercrítico, y la relación X/Y será menor que la multiplicación superficial; inversamente si el número de neutrones era mayor que Y el sistema es subcrítico y la relación es mayor que la multiplicación superficial.

En resumen la relación X/Y en términos de M_S es:

Para sistemas críticos	$X/Y = M_S$
" " supercríticos	$X/Y < M_S$
" " subcríticos	$X/Y > M_S$

Reflexión

La reflexión R de un reflector se define como el número probable de neutrones que reingresan al núcleo como resultado de uno que sale del mismo. Otra vez la relación Y/X será igual a R sólo si el sistema es crítico. Si el sistema es supercrítico, Y será el resultado de un número anterior de neutrones menor que X : entonces Y/X será menor que R .

Por el contrario, si el sistema es subcrítico Y/X será mayor que R .

La relación Y/X en términos de R es entonces:

Para sistemas críticos	$Y/X = R$
" " supercríticos	$Y/X < R$
" " subcríticos	$Y/X > R$

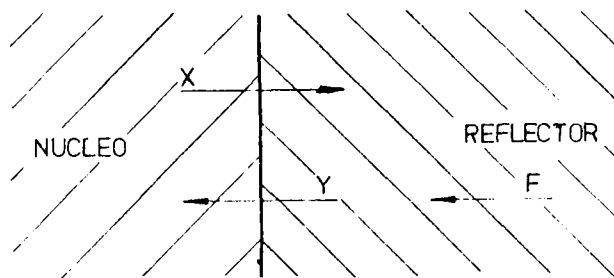
Si se multiplican los criterios de multiplicación y reflexión se tiene:

Para sistemas críticos	$MR = 1$
" " supercríticos	$MR > 1$
" " subcríticos	$MR < 1$

M y R son parámetros importantes para determinar el estado del sistema.

No se han medido experimentalmente pero su comportamiento puede deducirse y calcularse partiendo de principios físicos generales.

Multiplicación de un núcleo reflejado



Una vez establecida la autodistribución, se supone que se agrega una fuente externa de flujo F neutrones
 $\text{cm}^3 \text{ seg}$

Si el flujo entrante total es Y produce un flujo emergente X tal que

$$X = M Y$$

El flujo total hacia el núcleo es:

$$Y = R X + F$$

o sea

$$X = M R X + M F$$

por lo tanto:

$$X = \frac{M}{1 - MR} F$$

de donde:

$$\frac{X}{F} = \frac{M}{1 - MR}$$

el segundo término de esta ecuación es el número total de neutrones que dejan el núcleo como resultado de uno que penetra en él o sea es la multiplicación de un núcleo reflejado.

M se transforma en infinito cuando $1 - MR = 0$ o sea $1 - MR = 1$ que es la condición para un conjunto crítico.

Factores que afectan la multiplicación superficial

La multiplicación superficial M de un núcleo depende de su tamaño, forma y material así como también de la distribución angular y espectro de energía de los neutrones incidentes.

Distribución angular de los neutrones incidentes

Este es un factor que en la práctica no reviste importancia ya que depende principalmente del reflector; todos los materiales reflectores están constituidos por átomos que están separados por una distancia mucho menor que el camino libre medio de cualquier neutrón. Además los neutrones que vuelven al medio después de ser dispersados no difieren apreciablemente en su distribución angular excepto si hay un hueco entre el núcleo y reflector; el tamaño de ese salto influye en la distribución angular. Además los núcleos que son lo suficientemente grandes como para convertirse en críticos no son afectados por ligeras variaciones en la distribución angular de los neutrones incidentes.

Espectro de energía

La influencia del espectro de energía de los neutrones incidentes sobre el núcleo en el factor de multiplicación M , es en general muy limitada. Puede determinarse considerando el valor de M que corresponde a los neutrones de energías extremas en dicho espectro, o sea los neutrones térmicos y de fisión.

La diferencia esencial entre neutrones térmicos y de fisión es que los primeros tienen una probabilidad mucho mayor de ser capturados y producir fisión.

El caso más desfavorable es el que considera que todo neutrón térmico es capturado y produce fisión sobre el borde del núcleo. El resultado será el nacimiento en promedio de η neutrones rápidos por cada neutrón térmico, la mitad de los cuales abandona el núcleo y la otra mitad reingresa al mismo, dado el carácter isotrópico supuesto para su distribución. Por lo tanto si la multiplicación para neutrones de fisión es M_f , por cada uno de los $\eta/2$ que penetran en el núcleo resultarán M_f saliendo de él.

El número total de neutrones emergentes que resulta por cada neutrón térmico entrante estará dado por:

$$M_{\text{térmico}} = \frac{\eta}{2} (M_f + 1)$$

η es aproximadamente 2, por lo cual

$$M_{\text{térmico}} \approx M_f + 1$$

Entonces resulta que cualquier cambio en el espectro de energía producirá un cambio en M no mayor que 1.

Tamaño, forma y material

Los factores más importantes que influyen sobre M son el tamaño, la forma y el material del núcleo. Para núcleos de una determinada forma y material $1/M$ varía suavemente y en forma aproximadamente lineal con las dimensiones del núcleo. Los valores extremos de $\frac{1}{M}$ son 1 y 0.

$$\frac{1}{M} = 1 \text{ para un núcleo de tamaño infinitesimal.}$$

$$\frac{1}{M} = 0 \text{ para un núcleo crítico sin reflector}$$

Entonces, si se conocen algunos valores de $1/M$ es posible encontrar M , con buena aproximación, para todo el rango de tamaños desde cero hasta el tamaño crítico sin reflector. Esta aproximación lineal entre $1/M$ y las dimensiones no es válida para multiplicación térmica en caso de tratarse de núcleo metálico.

Geometría de placas

Puede demostrarse teóricamente que, para una placa infinita de espesor x .

$$\frac{1}{M} = \text{sen } 2c\theta \{ \text{ctg } (x+c)\theta + \text{ctg } 2c\theta \}$$

donde c es el espesor crítico de la placa sin reflector y θ es una constante para un material fisionable dado. Para placas metálicas esto corresponde a M rápido y hay que hacer la corrección habitual para hallar M térmico.

Para placas metálicas de U^{235} y Pu^{239} esta curva es parte de una curva tangente que es prácticamente una recta.

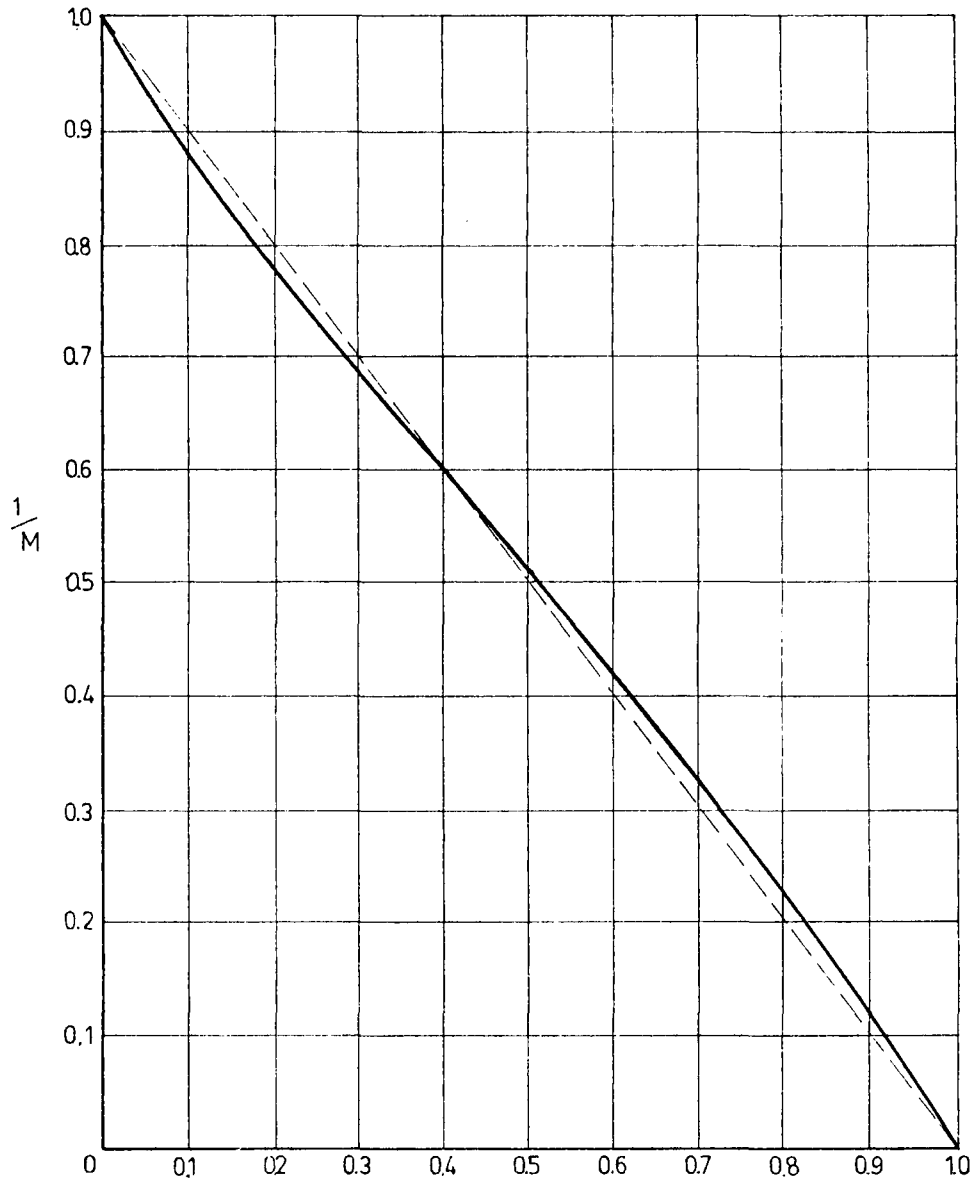
Para aproximar de modo seguro se realiza una interpolación mediante una línea recta entre $1/M = 1$ y $1/M = 0$.

En general se interpola linealmente entre:

$$\frac{1}{M} = 1 \text{ para espesor nulo}$$

$$\text{y } \frac{1}{M} = 0 \text{ para espesor crítico sin reflector}$$

El valor de M así determinado se aumenta en 1, lo que resulta un modo práctico y seguro de obtener M .

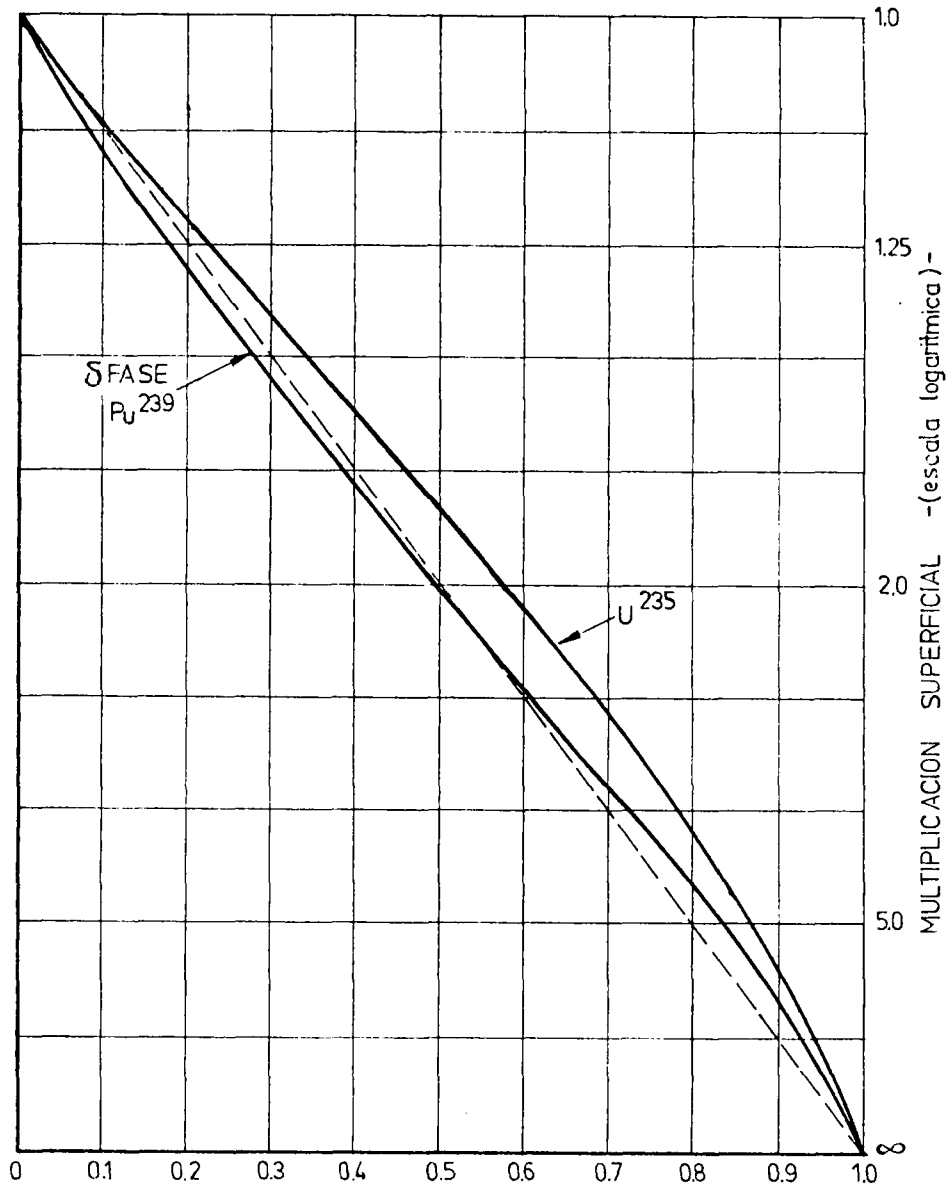


ESPOSOR DE PLACA COMO UNA FRACCION DEL ESPESOR CRITICO.

MULTIPLICACION SUPERFICIAL DE UNA PLACA INFINITA DE U^{235} METAL

Geometría esférica

Si se calcula M_f por medio de la teoría de difusión para dos grupos en esferas de Pu^{239} U^{235} metálicos, los resultados son similares a los anteriores.



RADIO DE LA ESFERA COMO FRACCION DEL RADIO CRITICO

MULTIPLICACION SUPERFICIAL DE ESFERAS DE METAL

Multiplicación por fuente central

La multiplicación por fuente central M_c se define como la relación entre flujo neutrónico saliente a través del límite del núcleo fisionable sin reflector y el flujo neutrónico entrante al núcleo desde una fuente neutrónica isotrópica ubicada en su centro.

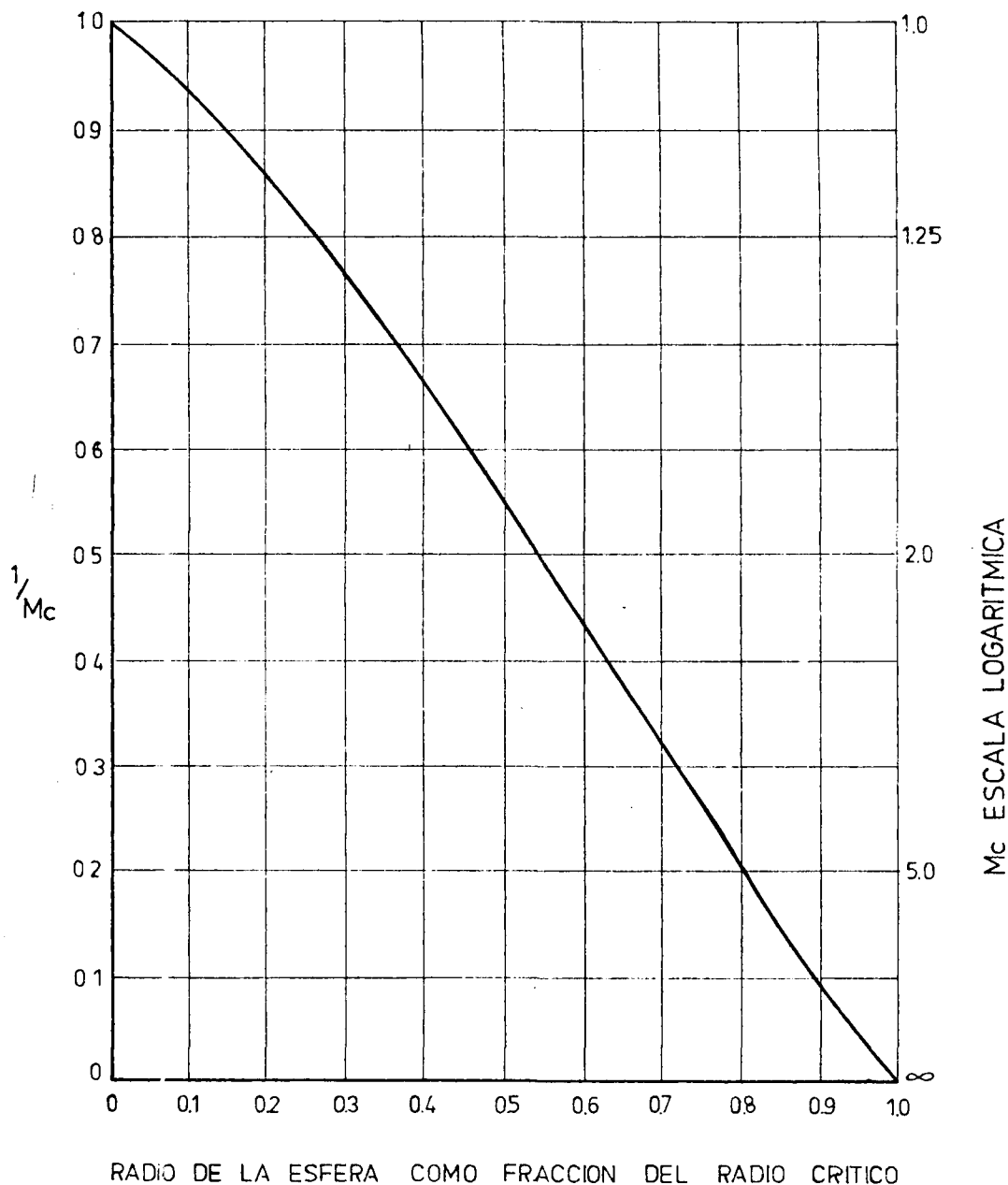
$$M_c = \frac{\text{cantidad de neutrones que salen del sistema}}{\text{cantidad de neutrones que emite la fuente}}$$

Se ha establecido que el factor de multiplicación superficial no se puede medir experimentalmente. La multiplicación por fuente central M_c se ha medido sólo en algunas zonas. M_c se comporta de manera similar a M_s .

$$\frac{1}{M_c} = 1 \text{ para un núcleo de tamaño infinitesimal}$$

$$\frac{1}{M_c} = 0 \text{ para un núcleo crítico sin reflector}$$

Sin embargo hay pequeñas diferencias en el comportamiento. Por ejemplo, se cree que la forma de la curva para $\frac{1}{M_c}$ en función del radio para un sistema esférico metálico, es:



La porción de curva desde

$$\frac{1}{M_c} = 1 \quad \text{a} \quad \frac{1}{M_c} = 0.2$$

ha sido medida experimentalmente y se ha calculado para otros valores de multiplicación.

Para deducir una sobreestimación de M_s a partir de mediciones de M_c se propuso que el número total de neutrones que sale del núcleo sin reflector si la fuente está en el borde exterior no será mayor que si está en el centro.

o sea
$$\frac{1}{2} (M_s + 1) \leq M_c$$

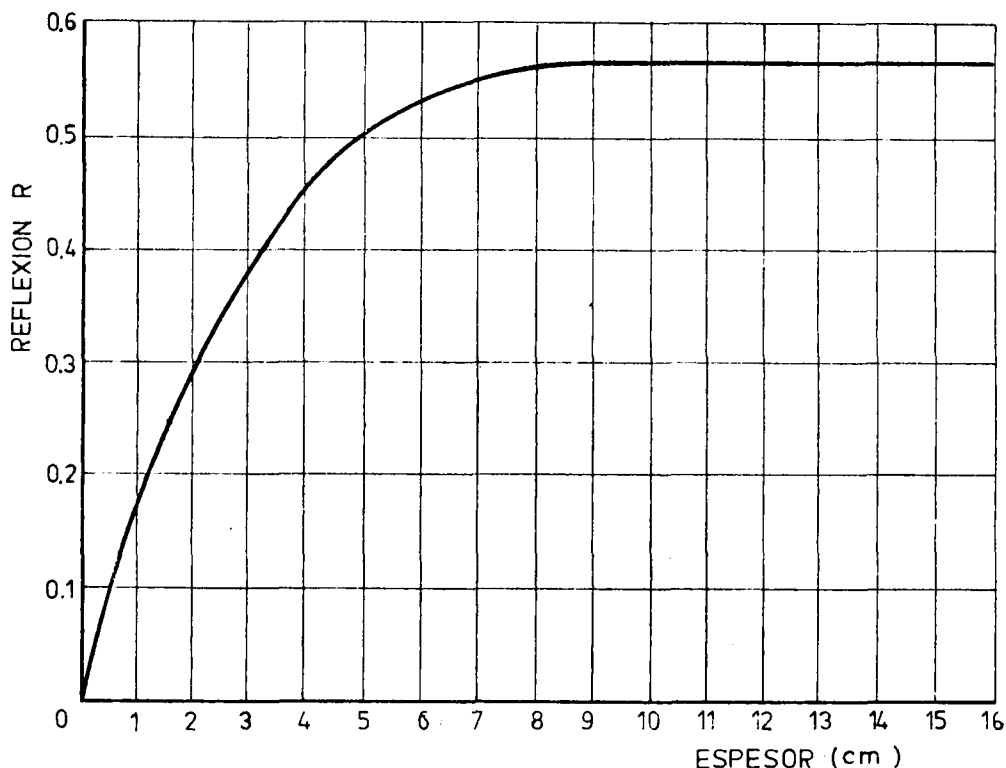
de donde
$$M_s \leq 2M_c - 1$$

Reflexión

La reflexión R depende de los mismos factores que afectan a M o sea: la distribución angular y el espectro de energía de los neutrones incidentes, el material, el tamaño y forma del reflector.

En general puede despreciarse tanto la influencia de la distribución angular, como la influencia del espectro de energía de los neutrones incidentes.

Si se grafica R en función del espesor del reflector, cualquiera sea el material o la geometría se obtiene una curva similar: R vale cero para espesor cero y llega finalmente a un valor límite que es menor que 1 si el reflector no contiene átomos físi les. El valor límite alcanzado corresponde a un reflector "efectivamente infinito".



REFLEXION DE UNA LAMINA INFINITA DE AGUA

Relación entre espesores y reflexión de materiales
(Geometría de placas)

Material	espesor (cm)	Reflexión	energía de neutrones
Madera con placa de Cd)	20	0.46	espectro del Pu metal
Uranio natural	8	0.66	espectro del U ²³⁵ metal
	16	0.74	"
	32	0.76	"
	64	0.765	"
Grafito	8	0.59	"
	16	0.73	"
	32	0.84	"
	64	0.92	"
Agua	4	0.45	"
	8	0.55	"
	16 o más	0.565	"
Agua	∞	0.8	térmico

La tabla muestra que el agua alcanza a los 16 cm su espesor efectivamente infinito y el uranio lo alcanza a los 64 cm, mientras que el grafito de 64 cm no se ha convertido en infinito. Esto significa que si hay más de 16 cm de agua rodeando un núcleo fisible, su estado no se altera apreciablemente poniendo más reflector, pero sin embargo si se tienen 60 cm de grafito puede alterarse el estado del sistema, aumentando el espesor de reflector.

Para neutrones térmicos incidentes el espesor efectivamente infinito será menor que los valores dados en la tabla porque el camino libre medio para neutrones térmicos es más corto que para neutrones rápidos. Para un material reflector dado, la geometría de placas es la que da valores máximos de reflexión.

Un neutrón que entra en un reflector penetra una cierta distancia promedio y luego vuelve a salir; la probabilidad de que retome al núcleo, y por lo tanto el valor de R, está influenciada por el tamaño del núcleo. Cuanto menor sea el tamaño del núcleo, tanto mayor deberá ser la multiplicación para satisfacer

$$MR = 1$$

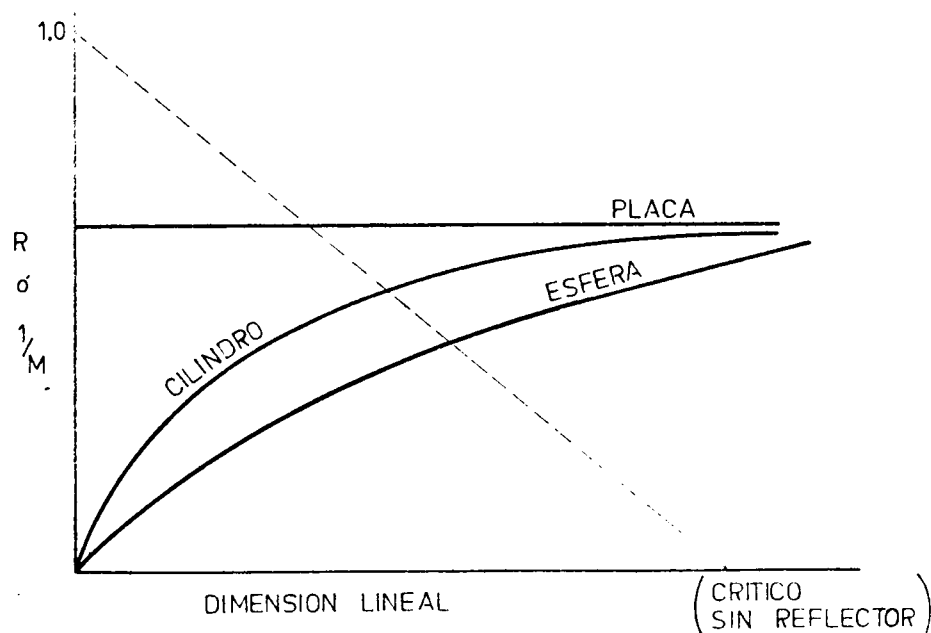
Aumento de R en función del radio del núcleo y el enriquecimiento

enriquecimiento en U^{235} del núcleo	radio del núcleo	R
100 %	6.7	0.45
65 %	8.25	0.46
28 %	9.5	0.49
5 %	15	0.54

Esta tabla es para núcleos constituidos por mezclas de $2 UO_2F_2 + 7 H_2O$ en cilindros infinitos reflejados por un espejo de agua infinito. Se puede ver que R aumenta cuando el radio del núcleo cilíndrico aumenta.

Variación de R con la geometría del sistema	
forma	R
Lámina infinita	0.57
cilíndro infinito	
$r = 6$ cm	0.45
esfera $r = 6$ cm	0.22

Comparación entre tamaños críticos desnudos y reflejados



Si se representa la variación del coeficiente de reflexión R en función de las dimensiones lineales (espesor o radio) del núcleo con reflector de agua infinita, se observa que en el caso de las placas, el valor R es independiente del espesor, con lo que queda representado por una recta paralela al eje de las abscisas. En el caso de cilindros y esferas, los valores de R corresponden a curvas que se aproximan asintóticamente a la de la placa.

Si se conocen las dimensiones críticas del núcleo sin reflector para una geometría dada, se puede superponer en el gráfico de R en función de la dimensión lineal la curva $1/M$ en función de la misma variable y la intersección de las dos curvas dará el correspondiente tamaño crítico reflejado.

Orden de efectividad relativa de materiales reflectores			
Núcleo metálico		Núcleo en solución	
reflector fino (~ 2.5.cm)	reflector grueso (∞)	reflector fino	reflector grueso (∞)
Be	Be	H ₂ O	Be
{ U	{ C	Be	C
{ H ₂ O	{ U	Fe	Fe
{ C	{ Fe	C	H ₂ O
{ Fe	{ H ₂ O		
{ Al	{ Al	{ Al	{ Al
{ Arena	{ Arena	{ Arena	{ Arena

III.1.3 Análisis de los parámetros estudiados en la Prevención de la Criticidad

Geometría: relación superficie - volumen

Puede entenderse el efecto del tamaño y forma del conjunto sobre la masa crítica, si alguna dimensión es suficientemente pequeña, la fracción de neutrones que escapa es grande. Para un volumen dado la esfera tiene menor superficie que cualquier otra forma geométrica; en consecuencia la pérdida de neutrones y por lo tanto la masa crítica son menores. La masa crítica aumenta a medida que la forma se desvía de la esfericidad. Así, una masa muy grande de material fisible puede ser segura en forma de un cilindro largo y de diámetro pequeño mientras que una masa mucho menor puede ser crítica si su forma es una esfera. En general, la mayoría de los neutrones que permanecen en el núcleo tienden a multiplicarse y aumenta así el valor de M . La probabilidad de escape en distintas geometrías depende entonces de la relación superficie-volumen.

El efecto de la forma en el reflector es justamente opuesto dado que el valor de R aumenta con la superficie. La combinación más desfavorable desde el punto de vista de prevención de criticidad es aquella en que la forma de núcleo y reflector haga máximo el valor del producto MR , que corresponde a una esfera o un cuerpo muy aproximado a ella.

Leyes de proporcionalidad de densidades

Una influencia muy importante para un sistema crítico es la variación de su densidad. Un aumento de la densidad da por resultado un empeoramiento en las condiciones de criticidad del sistema.

Este efecto está regido por la ley de proporcionalidad de densidades que establece:

"En cualquier sistema crítico, si la densidad en todas partes del mismo aumenta x veces su valor inicial y todas las dimensiones lineales reducen $\frac{1}{x}$ sus valores iniciales el sistema permanecerá crítico".

Si r es una dimensión lineal del núcleo de un sistema crítico; ρ_n la densidad del núcleo y ρ_t la densidad del reflector, esta ley establece que

$$r \propto \rho_n^{-1}$$

con la condición que el cociente $\frac{\rho_n}{\rho_t}$ permanezca constante.

Esta ley también puede expresarse en términos de la masa crítica como:

$$\text{masa crítica} = m_c \rho^{-2}$$

para sistemas de geometría finita.

La ley de proporcionalidad puede aplicarse en forma separada al núcleo y al reflector; para el núcleo establece que la multiplicación superficial M no cambia si la densidad y las dimensiones del núcleo cambian en proporción inversa. Para el reflector establece que la reflexión R no varía si la densidad y las dimensiones lineales del reflector varían en forma inversa.

Aplicaciones a distintas geometrías

En los siguientes casos se supone al núcleo no reflejado, y que m_c es la masa crítica de un núcleo de densidad ρ_0 y radio r_0 en el caso de un cilindro o espesor x_0 en el caso de una lámina.

Para un cilindro infinito la única dimensión lineal que puede variar es el radio. Supongamos que la densidad es ρ ; por la ley de proporcionalidad de densidad, para que el sistema se mantenga crítico, el radio deberá variar en un factor inverso a la densidad o sea en ρ_0/ρ

$$\frac{m_c}{\text{unidad de altura}} = \pi r^2 \rho$$

$$\text{donde } r = r_0 \frac{\rho_0}{\rho}$$

Entonces

$$\frac{m_c}{\text{unidad de altura}} = \pi \left(r_0 \frac{\rho_0}{\rho} \right)^2 \rho = \pi r_0^2 \rho_0^2 \rho^{-1}$$

de donde

$$\frac{m_c}{\text{unidad de altura}} \propto \rho^{-1}$$

La masa crítica por unidad de altura de un cilindro infinito es inversamente proporcional a la densidad.

En el caso de una placa infinita la única dimensión lineal variable es el espesor; por la ley de proporcionalidad de densidades para que el sistema se mantenga crítico a una variación de densidad corresponde una variación inversa en el espesor

$$\frac{m_c}{\text{unidad de superficie}} = x \rho$$

$$\text{donde } x = \frac{\rho_0}{\rho} x_0$$

$$\frac{m_c}{\text{unidad de superficie}} = x_0 \rho_0$$

Esta condición asegura que la masa por unidad de superficie permanece constante.

Un ensanchamiento o una compresión de la placa no cambia R o M y por lo tanto el reflector y el núcleo pueden ser ensanchados o comprimidos sin que haya ningún efecto sobre la criticidad. En este caso no es necesario que los cambios de densidad y dimensiones sean de la misma proporción en todo el sistema lo que se necesita es mantener la geometría de placas.

Dilución del núcleo

Hasta ahora se consideró un cambio de densidad como una expansión o compresión pura del sistema; pero puede pensarse como una dilución del núcleo con espacios vacíos.

Puede suponerse que en la dilución del núcleo ocurren dos procesos: primero, la reducción de la densidad y luego la ocupación de los espacios vacíos producidos con átomos de otro material. De acuerdo con esto habrá dos efectos distintos de la dilución: reducción de la densidad e interacción de los neutrones con los átomos agregados.

Puede clasificarse el comportamiento de los átomos diluyentes no físisles con respecto a los neutrones como:

- (i) dispersión
- (ii) absorción
- (iii) moderación o reducción de las energías de los neutrones.

Aunque todo material diluyente tiene un comportamiento que es una combinación de los anteriores, se considerará que cada comportamiento ocurre en forma exclusiva, comenzando en cada caso con un núcleo de material físil puro.

Adición de centros de dispersión

Estos centros dispersores son elementos pesados de secciones eficaces de absorción baja; el efecto es desviar los neutrones sin alterar su energía.

Estos centros dispersores modifican la distribución de neutrones y en general tienden a homogeneizar el flujo neutrónico.

En el caso de una esfera la adición de centros de dispersión reduce el número de neutrones que se generan radialmente y por lo tanto reduce el escape; esto hace que aumente el factor de multiplicación y por lo tanto reduce la masa crítica.

Para una placa o un disco fino los centros de dispersión aumentan el escape y por lo tanto la multiplicación M disminuye y la masa crítica aumenta.

Para un cilindro infinito el efecto es la disminución de la masa crítica debido a una disminución del escape.

Agregado de centros de absorción

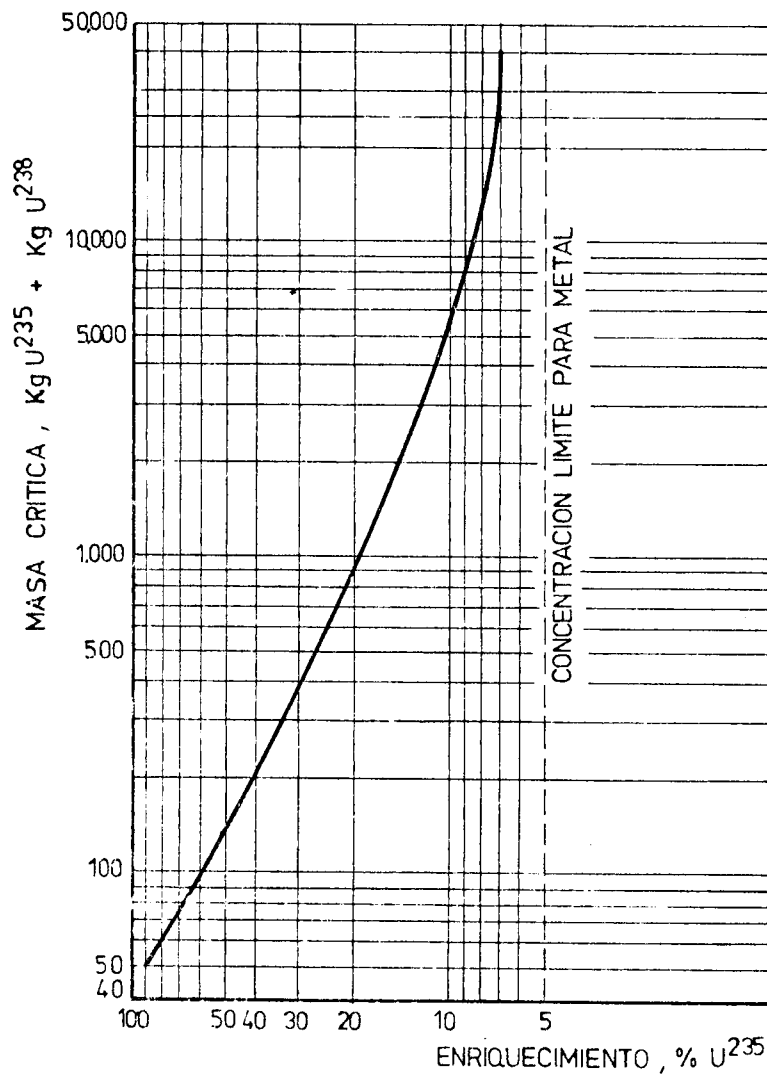
Los centros de absorción son elementos de gran sección eficaz de captura.

La adición de centros de absorción disminuye el número de neutrones en el núcleo y en consecuencia reduce el valor de M por lo que aumenta el tamaño crítico.

Adición de moderadores

Los moderadores son elementos de baja sección eficaz de captura y reducen la energía de los neutrones. Esto tiende a aumentar la probabilidad de fisión y disminuye el valor de la masa crítica.

Esto es válido hasta una dilución determinada, pues si ésta aumenta mucho, la sección eficaz de absorción del moderador prevalece y la masa crítica aumenta



ESFERA SIN REFLECTOR DE U^{235} METALICO
DILUIDO CON U^{238}

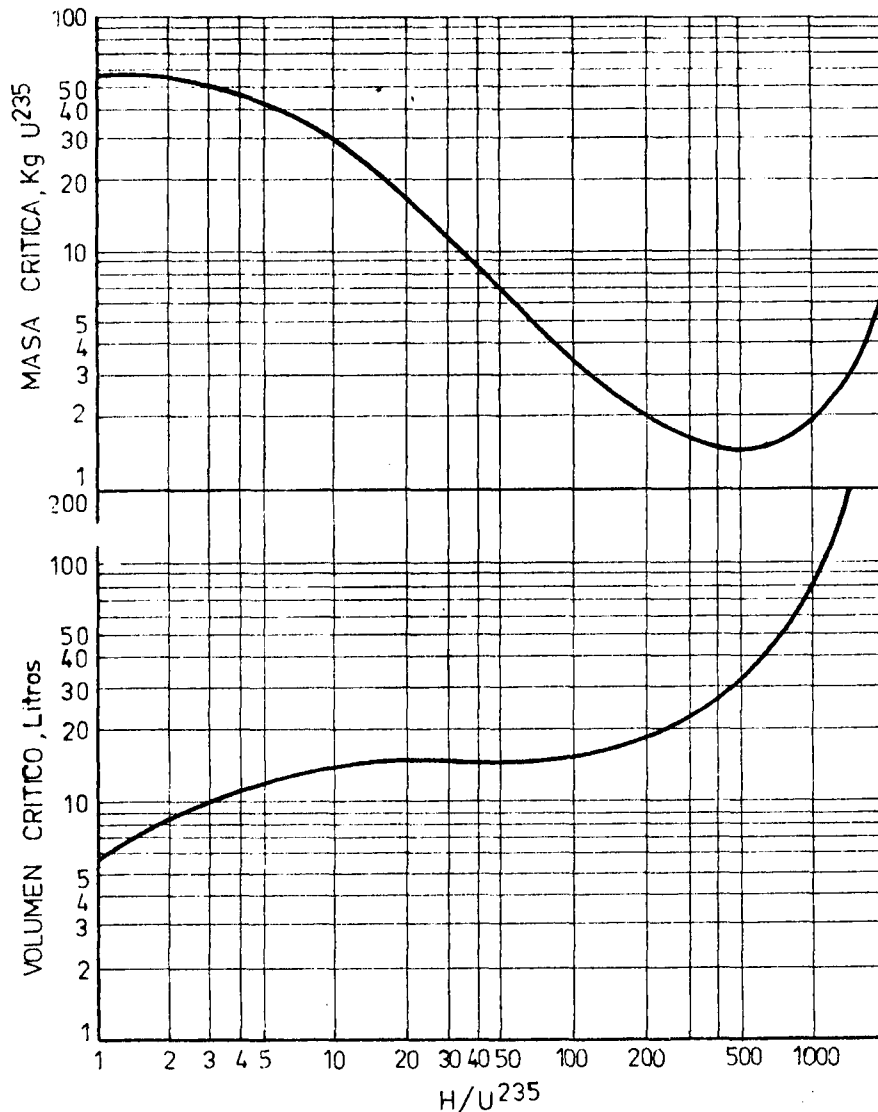
En este caso existe muy poca moderación debido a la dispersión inelástica; los factores más importantes a baja dilución son dispersión y absorción.

La curva crece suavemente a medida que aumenta la dilución y se convierte en asintótica al límite crítico de concentración para metal entre 85 % y 95 % de U^{238} .

Dilución con agua

El agua es el diluyente más común; los efectos sobre el estado de un sistema resultan de la reducción de densidad, dispersión por los átomos de hidrógeno y oxígeno y moderación y absorción por el hidrógeno.

Las curvas de masas y volumen crítico en función de la dilución en agua expresada como la relación atómica H/U (relación de moderación) para un núcleo esférico de U^{235} metálico sin reflector son:

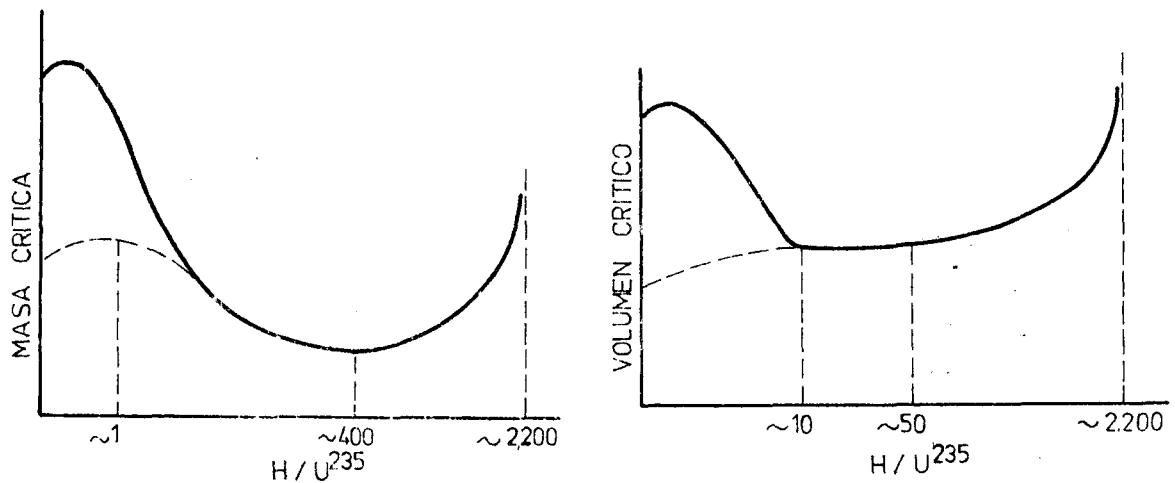


ESFERA SIN REFLECTOR DE U^{235} METALICO DILUIDO CON AGUA

Del análisis de estas curvas surge que, al agregar una pequeña cantidad de agua al metal puro, disminuye la densidad y por lo tanto aumentan la masa y el volumen crítico. Si aumenta esa cantidad de agua, aumenta la relación de moderación H/U ; en esta situación comienza a adquirir importancia el efecto moderador del hidrógeno, con lo cual se nota el decrecimiento de la masa crítica. Dado que el volumen crítico es proporcional a una potencia de orden menor de la densidad que la masa, se produce una suerte de inversión en el efecto de la variación de la moderación en el volumen crítico. Por esta razón el efecto sobre el volumen se observa para valores de la relación de moderación comprendidas entre H/U 10 y 20, a partir de allí la curva aparece paralela al eje de las abscisas hasta aproximadamente $H/U = 100$; debido al aumento de la absorción el volumen crítico comienza a aumentar. Correspondientemente la masa crítica disminuye hasta un valor mínimo para el valor H/U de aproximadamente 400 (valor de moderación óptimo). A partir de ese valor se hacen más notables los efectos de absorción del hidrógeno y de reducción de densidad, por lo que la masa crítica aumenta su valor.

Tanto el volumen como la masa crítica se transforman en infinito alrededor de $H/U = 2200$. A diluciones mayores el efecto de absorción por hidrógeno es suficiente para que un sistema no se transforme en crítico cualquiera sea su tamaño.

En la práctica es muy difícil tener un núcleo homogéneo de U^{235} metálico diluido con agua, generalmente el material fisible se presenta como una sal disuelta en agua



Las curvas de masa crítica y volumen crítico para diluciones de una sal de uranio en agua son casi exactamente las mismas que para mezclas metal-agua, excepto a altas concentraciones. El tamaño crítico original de una sal no diluida es mucho mayor que para un metal puro, debido a que:

- 1) El menor volumen crítico corresponde a un metal fisionable puro.
- 2) La menor masa crítica corresponde a sistemas bien moderados.

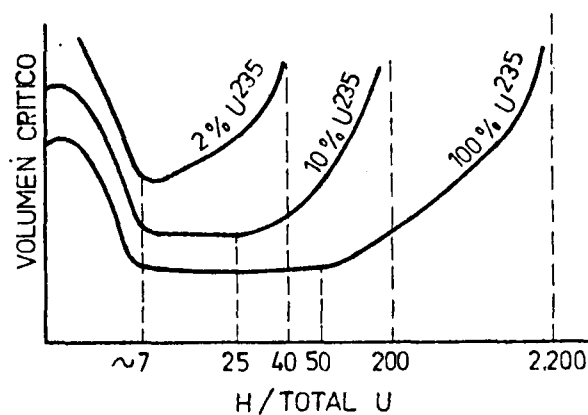
3) Si el elemento fisionable está asociado con elementos tales como U^{238} , Pu^{240} , O, F, etc. entonces el volumen crítico no es necesariamente el del sistema no moderado. Hay una dilución máxima para la cual es imposible alcanzar el estado crítico. Ese valor límite de H/X es un parámetro importante

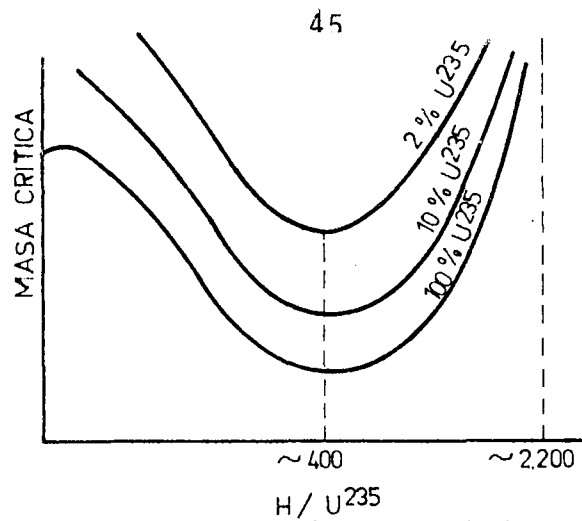
Valores limitantes de H/X		
Elemento físil X	Relación de moderación H/X	concentración solución acuosa g/l
U^{233}	2250	11.5
U^{235}	2260	11.6
Pu^{239}	3470	7.7

Estos valores son únicamente válidos para soluciones acuosas.

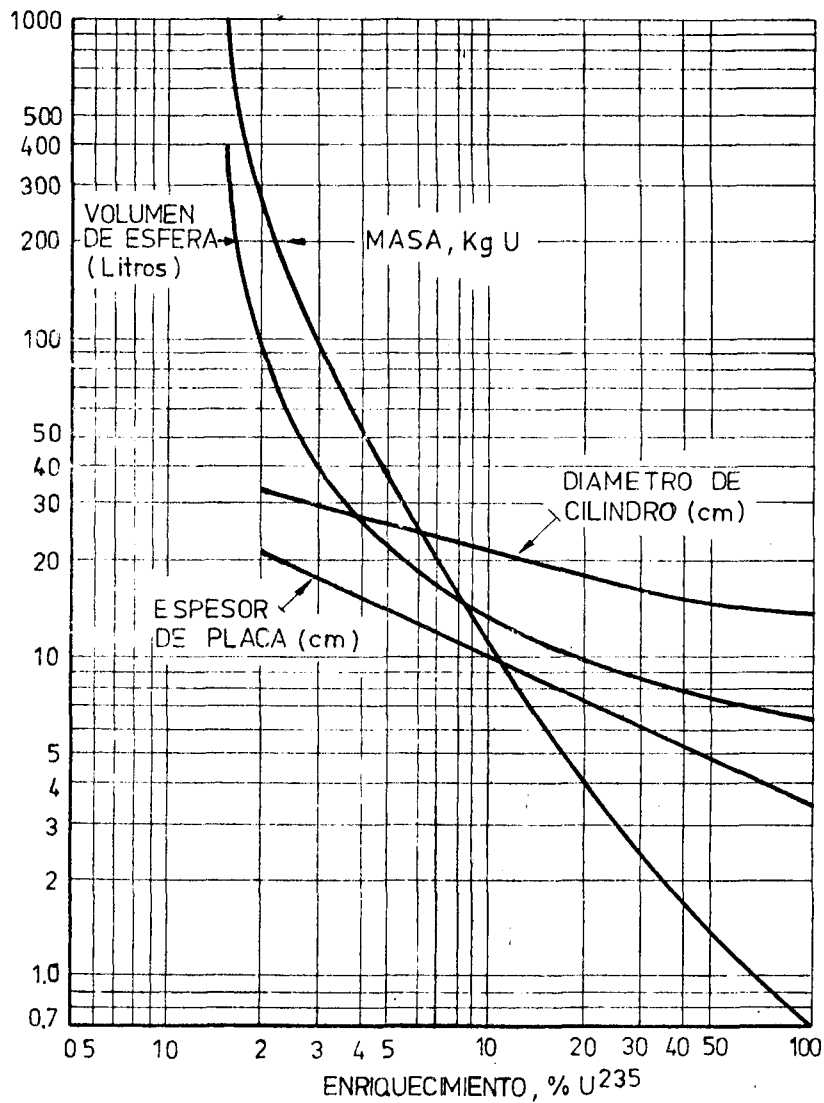
Dilución con U^{238} y agua

Este caso de dilución es el que corresponde a soluciones de uranio enriquecido.



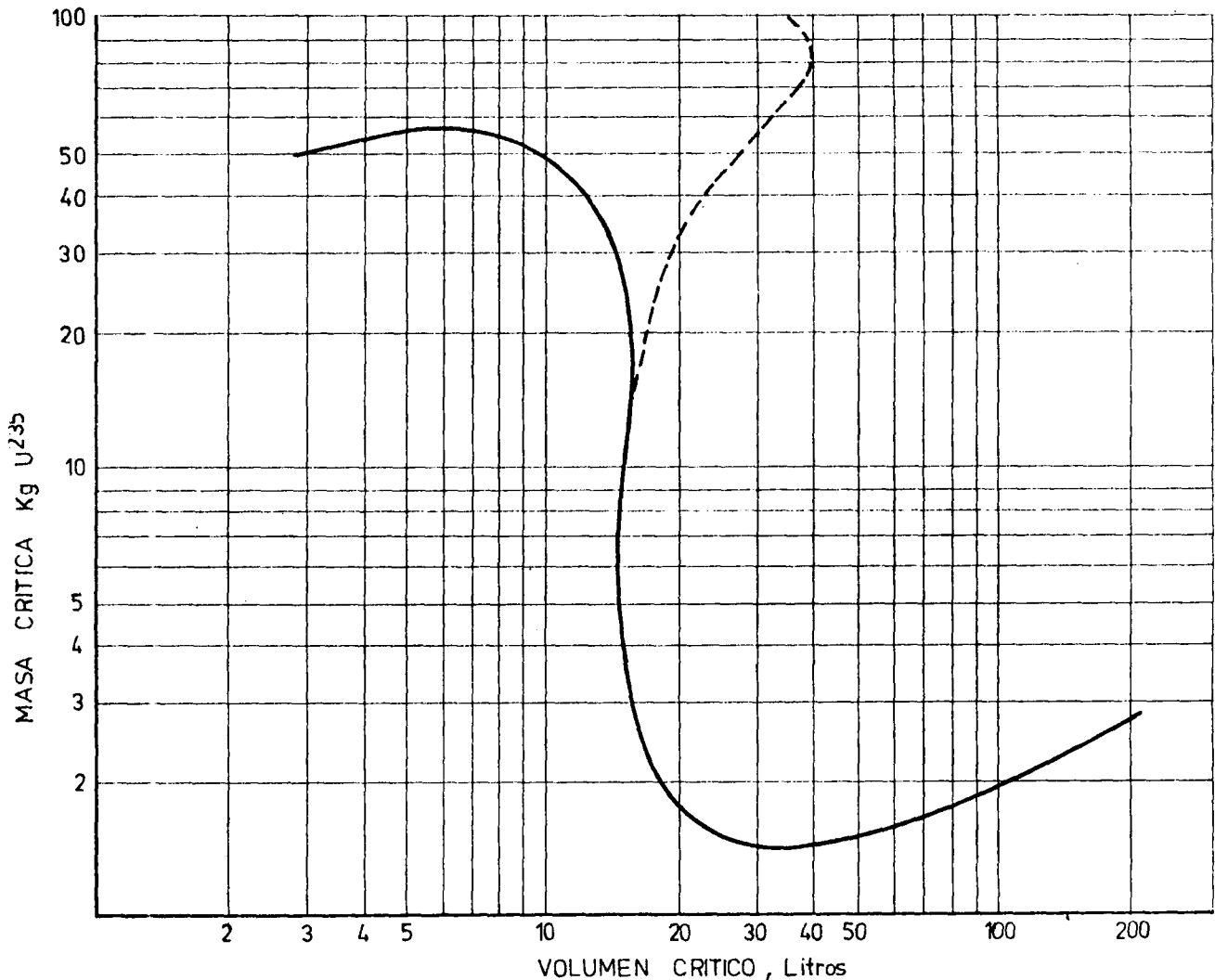


Otros parametros de importancia en criticidad que usualmente se dan en forma gráfica son la masa, el volumen, el diámetro del cilindro y el espesor crítico mínimo de placas en función del enriquecimiento.



Volumen crítico y masa crítica

Si se grafica para una dada dilución la masa crítica en función del volumen crítico de mezclas de uranio-agua; las curvas que se obtienen difieren en la zona de las bajas diluciones según se trate de mezclas de uranio metálico-agua (curva llena) o de soluciones acuosas de sales de uranio (línea de puntos). Puede separarse la curva obtenida en 3 regiones que muestran distintos comportamientos.



CURVA DE MASA CRITICA / VOLUMEN CRITICO PARA MEZCLAS ACUOSAS DE U²³⁵

- i) La masa crítica varía muy poco en el caso de uranio metálico y agua para volúmenes pequeños. En el caso de mezclas de sal de uranio y agua la masa comienza a disminuir casi inmediatamente a baja dilución.
- ii) Hay una región donde el cambio de masa es apreciable manteniéndose el volumen casi constante.
- iii) La tercera región muestra un crecimiento tanto en la masa como en el volumen, después que la masa alcanzó su valor mínimo, el que corresponde a la situación de moderación total del sistema.

Este gráfico puede usarse para determinar qué masa puede convertirse en crítica para un determinado volumen disponible y de acuerdo a ello imponer los límites.

Núcleos heterogéneos

Para decidir la naturaleza homogénea o heterogénea de un medio desde el punto de vista neutrónico conviene comparar el tamaño de sus constituyentes con el camino libre medio de los neutrones.

Así por ejemplo; una red de placas de uranio en agua es un conjunto físicamente heterogéneo, pero si las placas son suficientemente delgadas como para que un neutrón pueda atravesar varios espesores sin interactuar, se lo considera homogéneo.

Criterios para el análisis de sistemas críticos basados en el k_{ef} de la teoría de reactores

Ya que $k_{ef} = k_{\infty} \cdot P$ los factores que lo afectan serán:

- 1) Los que actúan sobre k_{∞}
 - . moderación
 - . envenenamiento
 - . enriquecimiento
 - . heterogeneidad
- 2) Los que actúan sobre P
 - a) los que influyen sobre la probabilidad de los neutrones de alcanzar los límites del núcleo.
 - . dimensiones
 - . forma
 - . densidad
 - . temperatura
 - b) Los que afectan la probabilidad de los neutrones de retornar al medio
 - . reflexión
 - . interacción

Si el sistema es crítico ($k_{ef} = 1$) cada uno de estos parámetros puede llamarse crítico.

Moderación:

La presencia de núcleos moderadores afecta la absorción y difusión de los neutrones, por lo tanto influye en la reacción en cadena.

El moderador disminuye la energía de los neutrones creados en las fisiones y la sección eficaz de fisión es mayor para neutrones térmicos, por lo que actúa en sentido favorable sobre la reacción en cadena.

Pero un moderador también tiene un cierto poder de captura que va a actuar en sentido contrario disminuyendo la población neutrónica.

La verdadera eficacia de un moderador se mide por la relación moderación/captura.

Envenenamiento

Se consideran venenos a los materiales que capturan en forma considerable los neutrones térmicos (por ejemplo, Cadmio y Boro).

La presencia de venenos siempre disminuye el valor de k_{∞} ya que constituyen una captura suplementaria.

Enriquecimiento

Se define como la relación de la masa de los núcleos físiles sobre la masa total de todos los isótopos presentes; en la práctica, esta relación es aproximadamente igual a la relación de los números de los núcleos correspondientes.

Para un valor de H/U^{235} constante un mayor enriquecimiento disminuye la proporción de trampas de U^{238} y por lo tanto aumenta el k_{∞} . A pesar que la presencia de U^{238} produce una ligera ganancia debida a las fisiones que se producen por los neutrones de alta energía ese efecto se compensa por la captura. El razonamiento es análogo para la mezcla de Pu^{239} y Pu^{240} .

Heterogeneidad

La heterogeneidad actúa sobre k_{∞} de forma compleja, dependiendo de la importancia relativa de las absorciones de neutrones rápidos y térmicos.

En la práctica, para enriquecimientos mayores del 5 % un medio homogéneo es más reactivo o sea menos seguro que uno heterogéneo; para enriquecimientos menores del 5 % el medio heterogéneo es más reactivo.

Como ejemplo, el uranio natural puede dar una reacción en cadena sólo si el sistema es heterogéneo.

Dimensiones

Se considera un medio de composición definida, por ejemplo una solución, donde el k_{∞} sea mayor que 1 y se supone que se la ubica en un recipiente de proporciones y forma definidas y que las dimensiones aumentan.

Se puede definir la trayectoria media recorrida por los neutrones desde su nacimiento hasta su absorción, la que dependerá de su camino libre medio y del número de interacciones sufridas en ese tiempo.

Si las dimensiones del recipiente son del orden de la trayectoria media de los neutrones, prácticamente todos los neutrones producidos en el volumen tendrán una cierta probabilidad de alcanzar los límites y escapar del sistema; el coeficiente P será pequeño y el k_{ef} menor que 1, por lo tanto el sistema será subcrítico.

Si las dimensiones del recipiente son mucho mayores que la trayectoria media, únicamente los neutrones producidos en una capa externa tienen probabilidad de alcanzar los límites y escapar del sistema, que podrá ser del mismo orden que en el caso anterior; pero todos los neutrones producidos en las capas in-

ternas del recipiente prácticamente no tendrán ninguna posibilidad de alcanzar el borde y la probabilidad P , que se aplica a todos los neutrones, será mayor que en el primer caso. El espesor de la capa externa depende de la trayectoria media, o sea del camino libre medio y de la absorción de los neutrones.

A medida que aumentan las dimensiones, aumenta el volumen de las capas internas y por lo tanto el factor P .

En el límite, si el recipiente es muy grande, las capas externas representan un volumen despreciable frente al volumen total y la casi totalidad de los neutrones no tiene ninguna posibilidad de alcanzar los bordes; el factor P es igual a 1 y $k_{ef} = k_{\infty} > 1$; el recipiente es super-crítico.

Como P aumenta en forma continua con las dimensiones del recipiente, existe una dimensión en la que k_{ef} es igual a 1; estas dimensiones por definición son las dimensiones críticas y su volumen, volumen crítico.

Como el medio está bien definido por su composición y densidad, a ese volumen corresponde una cierta masa llamada masa crítica.

Forma geométrica

Comparando dos recipientes del mismo volumen, pero de distintas formas, se puede afirmar que P será más grande para el recipiente que tenga menor superficie, ya que las fugas aumentan proporcionalmente a la superficie.

La influencia de la relación superficie/volumen sobre el k_{ef} supone implícitamente una distribución uniforme de los neutrones en todo el volumen y en particular en la superficie.

La esfera es la forma más reactiva, y por lo tanto más pesimista puesto que tiene asociada la menor masa crítica.

Densidad

Para un medio de composición definida, a medida que aumenta la densidad es menor el camino libre medio y por lo tanto su trayectoria media.

Manteniendo constante la composición de un medio, el k_{ef} aumenta con la densidad o el volumen crítico disminuye al aumentar la densidad.

Temperatura

La temperatura de un medio actúa principalmente modificando el volumen y la densidad, pero también modifica las propiedades intrínsecas de difusión y sobre todo de absorción de los núcleos. La influencia global de la temperatura sobre el k_{ef} es el resultado de diversos factores y su signo depende de cada caso particular; pero en general el k_{ef} aumenta si disminuye la temperatura.

Presencia de núcleos difusores

La presencia de ciertos núcleos pesados que sólo ocasionan choques elásticos aumenta el número de desviaciones sufridas por los neutrones y da como resultado que la mayoría de éstos tienen una probabilidad menor de escapar del núcleo. En la mayoría de los casos estos núcleos aumentan el k_{ef} disminuyendo la masa crítica excepto en el caso de formas delgadas, como placas y dis-

cos donde el efecto es inverso y en esos casos el k_{ef} disminuye.

Reflexión

Hay ciertos materiales, como el agua y la madera, que tienen la propiedad de dar a los neutrones una cierta probabilidad de volver al núcleo una vez que alcanzan el límite; esto hace que aumente el valor de P lo que equivale a decir que disminuye la masa crítica y que aumenta el k_{ef} . Puede existir una reflexión parcial, como por ejemplo una pared o una persona que se acerca al recipiente. Si el reflector tiene poder moderador influirá también sobre el k_{∞} .

Interacción entre medios multiplicadores

Autointeracción

Si existen concavidades en la superficie del recipiente, un neutrón que llega a ella tiene cierta probabilidad de volver al medio, lo que disminuirá su masa crítica.

Interacción con medios exteriores

La interacción entre medios multiplicadores es fundamental en criticidad al igual que el aislamiento.

Se dice que un recipiente está aislado si ningún neutrón que proviene de fisiones exteriores a ese recipiente puede penetrar su superficie; este es el caso de un recipiente rodeado de un espesor suficiente de blindaje; si se intercambian neutrones entre dos o más medios multiplicadores se dice que existe interacción entre esos medios.

Si un recipiente recibe un aporte de neutrones de los otros medios con que interacciona (que en algunos casos puede ser mayor que la producción de sus propias fisiones internas), su k_{ef} será mayor que si estuviera aislado.

III.1.4. Interacción y almacenamiento

Reces

Antes de considerar la interacción es muy importante tener en cuenta la influencia del enriquecimiento con U^{235} sobre la criticidad de las redes.

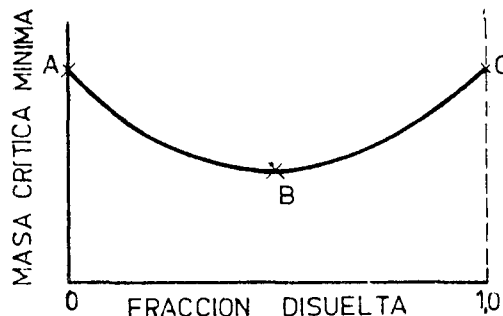
Un sistema heterogéneo será más crítico que uno homogéneo de las mismas características si el uranio es ligeramente enriquecido y menos crítico a altos enriquecimientos. El enriquecimiento intermedio para el cual no se afecta la criticidad es aproximadamente 5 % en una red regular de barras de uranio.

Los enriquecimientos mínimos en que puede haber criticidad son del 5,5 % para núcleos de uranio metálico, del 1% para núcleos homogéneos de uranio moderado con agua y aproximadamente el enriquecimiento natural de 0,72% para redes de uranio/agua.

Problema del disolvente

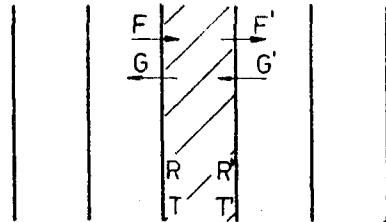
Se dispone de un sistema inicial heterogéneo compuesto de piezas irregulares de material fisiónable en un medio ácido. El sistema final es una solución acuosa de la sal metálica.

El problema consiste en definir el estado crítico del sistema a medida que cambia de la condición inicial a la final. El gráfico de la menor masa crítica en función de la fracción de metal disuelta es:



Generalmente se conocen los valores A y C; acerca del mínimo B hay muy pocos datos y sólo de algunos sistemas en particular, lo que hace difícil el estudio de criticidad en sistemas en dilución porque no se puede precisar cuál es el estado de disolución que da la menor masa crítica. En algunos casos ese mínimo puede coincidir con A o con C hasta el momento, todo lo que puede concluirse es que ni el sistema original ni la solución completa, necesariamente proporcionan la masa crítica mínima.

Conjuntos que interactúan - parámetros de interacción
Geometría de placas



Se considera un conjunto de placas interactuantes que ha alcanzado el estado estacionario. Sean:

\$F, G, F'\$ y \$G'\$ los flujos de neutrones a través de los límites.

\$T\$ la probabilidad que el neutrón sea transmitido hacia la derecha.

\$T'\$ la probabilidad que el neutrón sea transmitido hacia la izquierda.

\$R\$ la probabilidad que el neutrón sea reflejado por el borde izquierdo.

\$R'\$ la probabilidad que el neutrón sea reflejado por el borde derecho

El balance de neutrones para esa placa estará dado por

$$F' = TF + R'G'$$

$$G = T'G' + RF$$

Reordenando queda:

$$F' = TF + R'G' \quad (1)$$

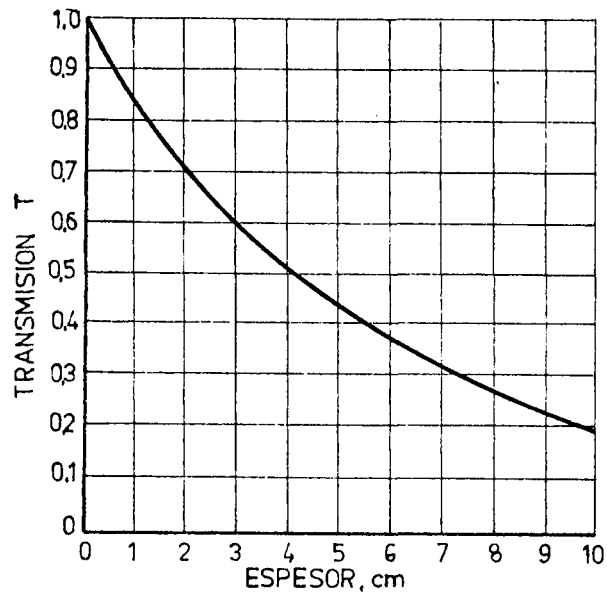
$$G' = \frac{G - RF}{T'} \quad (2)$$

que permiten calcular los flujos a través de uno de los bordes conociendo los flujos a través del otro borde y los parámetros \$R, T, R'\$ y \$T'\$. Esto permite hacer el estudio de criticidad de un conjunto de placas conociendo todos los valores de \$R\$ y \$T\$. Si se supone que el flujo entrante en el borde extremo izquierdo es cero y el flujo saliente uno, puede calcularse paso a paso el flujo entrante en cada borde del conjunto hasta el extremo derecho. Si este flujo es positivo el sistema es subcrítico ya que se necesita un aporte exterior de neutrones para mantener el equilibrio. Si el flujo entrante es cero el sistema es exactamente crítico y si es negativo es supercrítico.

Reflexión y transmisión para placas no fisionables

En la aplicación del análisis anterior se vio que la única información esencial son los valores de la reflexión \$R\$ y la transmisión \$T\$. La reflexión de placas de material de -

pende de la distribución angular y del espectro de energía de los neutrones, del material y espesor de la placa reflectora. La transmisión también depende de los mismos factores pero su comportamiento es diferente que el de la reflexión. La transmisión es mayor para neutrones del espectro de fisión que para los térmicos y disminuye a medida que aumenta el espesor de la placa



TRANSMISION DE UNA PLACA
INFINITA DE AGUA

En el caso de placas no fisionables existe la absorción que es la diferencia de la unidad y la suma de R y T

$$R + T < 1$$

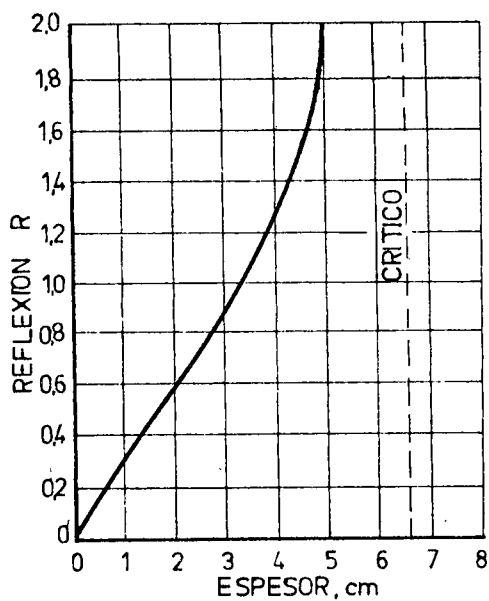
$$1 - (R + T) = x$$

donde x es una medida del poder absorbente del material

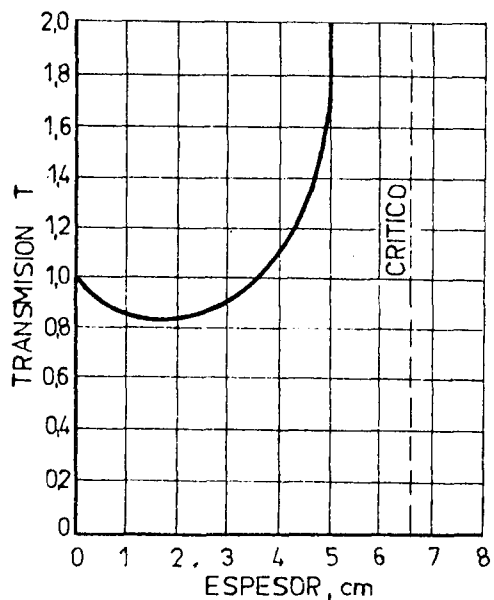
Valores de R y T para placas no fisionables (espectro de neutrones incidentes cercano al de fisión)			
Material	espesor cm	Reflexión R	transmisión T
Madera (con Cd)	20	0.46	0.15
Uranio Natural	8	0.66	0.30
	16	0.74	0.15
	32	0.76	0.001
Grafito	8	0.59	0.41
	16	0.73	0.27
	32	0.84	0.16
	64	0.92	0.06
Agua	4	0.45	0.51
	8	0.55	0.26
	16	0.56	0.075

Reflexión y transmisión para placas fisionables

En este caso dado que R es el número de neutrones reflejado y T el de transmitidos por cada placa por cada neutrón que penetra, la suma de los dos debe ser igual a la multiplicación superficial.



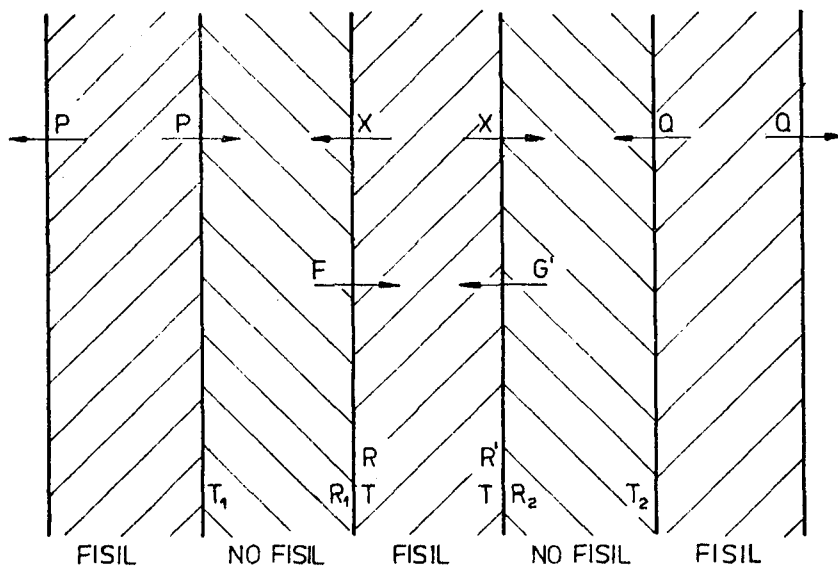
REFLEXION DE UNA PLACA
INFINITA DE U²³⁵



Parámetros de interacción para geometría de placas

Las ecuaciones (1) y (2) pueden simplificarse y ser expresadas en términos de M suponiendo que los flujos salientes de ambas caras de cada placa fisiónable son iguales, o sea $F' = G = X$

Si se considera el siguiente sistema de varias placas de material fisiónable intercaladas con otras de material no fisiónable, como en la figura



las ecuaciones de balance neutrónico para la placa central son:

$$X = T F + R' G'$$

$$X = T' G' + R F$$

de donde

$$\begin{aligned} 2X &= (R + T) F + (R' + T') G' \\ &= M F + M' G' \end{aligned}$$

Para la placa no fisionable izquierda

$$F = T_1 P + R_1 X$$

y para la derecha

$$G' = T_2 Q + R_2 X$$

entonces:

$$\begin{aligned} 2X &= M F + M' G' = M (T_1 P + R_1 X) + M' (T_2 Q + R_2 X) \\ &= M T_1 P + M R_1 X + M' T_2 Q + M' R_2 X \end{aligned}$$

de donde queda:

$$X = \frac{M T_1}{2 - M R_1 - M' R_2} P + \frac{M' T_2}{2 - M R_1 - M' R_2} Q$$

que se puede escribir:

$$X = q_1 P + q_2 Q \quad (3)$$

donde

$$q_1 = \frac{M T_1}{2 - M R_1 - M' R_2} \quad \text{y} \quad q_2 = \frac{M' T_2}{2 - M R_1 - M' R_2}$$

q_1 y q_2 se llaman parámetros de interacción y se definen como el número de neutrones que salen de la placa fisionable central como resultado de un neutrón que abandona la placa interactuante apropiada.

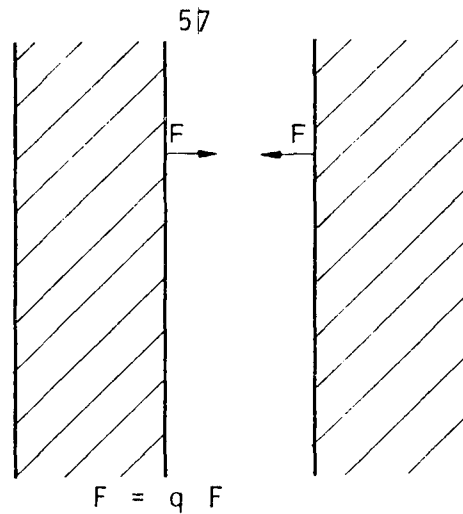
Si las placas no fisionables son idénticas entonces:

$R_1 = R_2 = R_0$; $T_1 = T_2 = T_0$ y $M = M'$; los parámetros de interacción pueden expresarse como:

$$q_1 = q_2 = \frac{1/2 M T_0}{1 - M R_0}$$

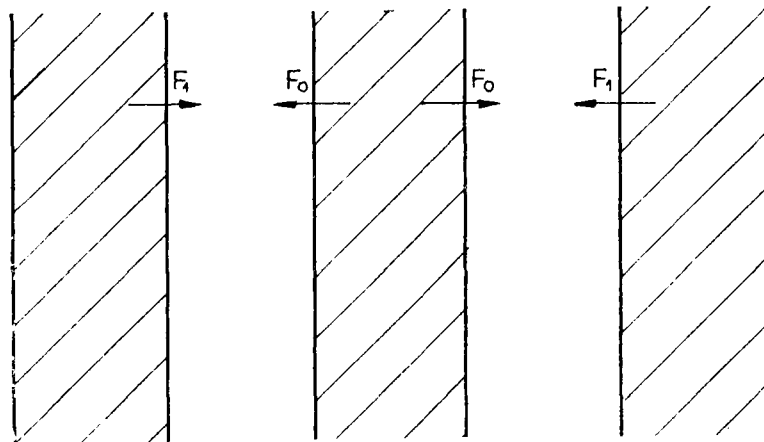
Ahora el problema de criticidad puede tratarse en términos de los parámetros de interacción y de los flujos que abandonan las placas interactuantes.

Para dos placas, por simetría, el flujo F que sale de cada una es el mismo; la condición de criticidad sería:



por lo tanto $q = 1$

Para tres placas los flujos salientes de las placas exteriores por simetría serán iguales (F_1) y las salientes de la placa central F_0



se tiene para la placa central:

$$F_0 = q F_1 + q F_1 = 2q F_1$$

para cada placa lateral:

$$F_1 = q F_0$$

combinando las dos ecuaciones:

$$F_0 = 2q^2 F_0$$

por lo tanto

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$$

Para cuatro placas, el flujo saliente de cada placa interior se considera F_0 y de las externas F_1 . Para cada placa interior será:

$$F_0 = q F_0 + q F_1$$

Para un número infinito de placas el flujo saliente de cada una será el mismo (F)
Se tiene para cada placa

$$F = 2 q F$$

de donde $q = 0,5$

Parámetro de interacción para un conjunto de placas alineadas	
parámetro de interacción q	número crítico de placas
∞	1
1.0	2
0.707	3
0.618	4
0.577	5
0.555	6
0.521	10
0.5	∞

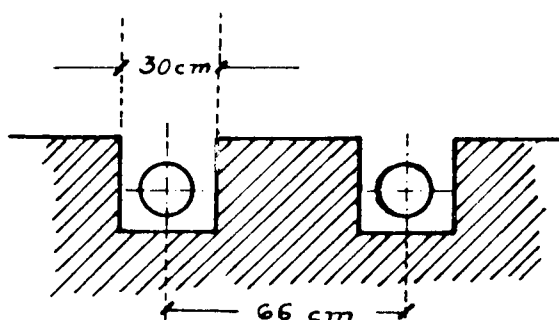
Parámetro de interacción para otras geometrías

Se puede definir un parámetro de interacción q_{ij} en términos generales para cualquier conjunto interactuante como el número de neutrones que salen de la pieza j del conjunto como resultado de un neutrón que sale de la pieza i, cuando no se involucren otras piezas fisionables. El parámetro de interacción q_{ij} puede dividirse en dos partes

$$q_{ij} = P_{ij} \left\{ \frac{M_j}{1 - R_j M_j} \right\}$$

donde P_{ij} es la probabilidad que un neutrón que sale de la pieza i alcance la j sin que interaccione con otra pieza fisionable en el camino y el factor de multiplicación $M_j/(1-R_j M_j)$ es el número total de neutrones que salen de la pieza j como resultado de uno que penetra en ella.

Cuando las piezas del conjunto son compactas, como en la mayoría de los problemas de almacenamiento, los parámetros de interacción pueden medirse experimentalmente. Por ejemplo, en el caso de dos esferas de 20 kg de U^{235} ubicadas en el centro de contenedores de 30 cm de diámetro y espaciados en 66 cm para distintos medios se dan en la siguiente tabla.



Parámetros de interacción para distintos medios	
Medio	Parámetro de interacción q_{ij}
aire	70.6×10^{-4}
arena	29.0×10^{-4}
arena + placa Cd	4.5×10^{-4}
agua	0.374×10^{-4}
agua + placa Cd	0.091×10^{-4}

Estos resultados muestran la efectividad del agua como material para procurar seguridad en el almacenamiento especialmente si las piezas fisionables están revestidas con una placa de cadmio.

Estos resultados son exclusivamente para esta geometría particular.

Uso de los parámetros de interacción

En un caso general los parámetros de interacción pueden usarse exactamente igual que en el caso de geometría de placas. Las condiciones de criticidad estarán dadas por un sistema de ecuaciones del tipo:

$$F_j = \sum_{i \neq j} q_{ij} F_i \quad (1)$$

donde F_i es el flujo de neutrones que abandonan la pieza i .

El conjunto será crítico si los parámetros de interacción son tales que existe una solución distinta de $F_j = 0$ para todas las piezas o sea una solución no trivial.^j

Si el conjunto tiene un número razonable de piezas las ecuaciones pueden resolverse exactamente; por ejemplo, si se tiene un sistema formado por tres piezas idénticas ubicadas en los vértices de un triángulo equilátero, se consi-

dera que el flujo saliente de cada pieza es el mismo y que el parámetro de interacción entre cada par es el mismo; de acuerdo con esto la condición de criticidad para cada pieza es:

$$F = 2 q F$$

$$q = 0,5$$

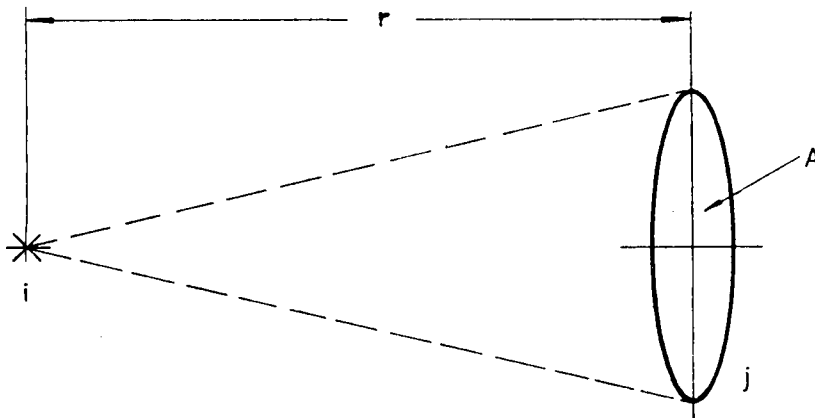
Las ecuaciones (1) pueden simplificarse, reemplazando cada valor de F_j por el mayor valor de flujo emergente F_m en la ecuación correspondiente a la pieza m . La condición de criticidad es en ese caso:

$$\sum_{i \neq m} q_{im} = 1$$

En general para un conjunto de piezas similares m es la pieza central.

Propiedades de los parámetros de interacción

Conjuntos espaciados por aire



Un conjunto espaciado por aire en general puede tratarse como si estuviera en el vacío. Puede calcularse, la probabilidad P_{ij} como el ángulo sólido fraccional subtendido en la pieza i por la pieza j ; si la distancia entre i y j es r y A es el área de j vista por i entonces:

$$P_{ij} = \frac{A}{4 \cdot \pi r^2}$$

Si hay otra pieza fisionable que apantalla parcialmente la j desde i , el valor del área A será reducida de su valor total por la parte que es apantallada. En particular, para un conjunto de piezas similares alineadas cada pieza sólo ve las dos adyacentes.

Conjuntos en medios absorbentes

Para un conjunto en un medio puramente absorbente es necesario introducir un factor que tenga en cuenta la atenuación:

$$P_{ij} = \frac{A}{4 \pi r^2} e^{-\phi r}$$

donde ϕ es una constante.

Para un medio real donde exista dispersión se puede mostrar que una buena aproximación es:

$$p_{ij} = \frac{C}{r} e^{-\phi' r}$$

donde C y ϕ' son constantes.

Conjuntos de piezas similares

Si se conoce el parámetro de interacción q_0 para una pequeña distancia de separación d entre dos piezas en un conjunto de piezas similares, se puede suponer que el parámetro de interacción para dos piezas cualesquiera separadas por una distancia mayor D_{ij} está dada por:

$$q_{ij} = \left(\frac{d}{D_{ij}} \right)^2 q_0$$

cuando el conjunto está separado por aire y

$$q_{ij} = \left(\frac{d}{D_{ij}} \right) q_0$$

para otro conjunto, ignorando los efectos de apantallamiento.

Distancia de aislación

La distancia de aislación puede interpretarse como la distancia para la cual el parámetro de interacción q_{ij} es despreciable.

El término p_{ij} disminuye a medida que aumenta la separación entre las piezas pero no se anula; por otra parte el término de multiplicación $M_j / (1 - R_j M_j)$ tiene un valor que aumenta indefinidamente a medida que cada pieza se aproxima a su tamaño crítico.

La distancia de aislación depende de las piezas fíisiles. Se puede definir una distancia de aislación para un par de piezas y un medio dado. Por ejemplo, para un conjunto de placas interactuantes la condición que hace q_{ij} despreciable puede ser que sea menor que 0.5. Para un medio como agua esto corresponde a una separación que varía desde algunos centímetros hasta kilómetros dependiendo del tamaño de las placas.

En la práctica, se limitará el tamaño de cada pieza de tal forma que el valor de $M_j / (1 - R_j M_j)$ esté acotado.

Aproximación de Oak-Ridge

La condición para que un conjunto de unidades que interactúan sea subcrítico es que: de cada unidad del conjunto se emita menos de un neutrón como consecuencia de un neutrón emitido desde cada una de las otras unidades.

La condición para que un conjunto de unidades sea crítico es que el siguiente sistema de ecuaciones tenga una solución no trivial.

$$\begin{cases} F_1 = q_{21}F_2 + q_{31}F_3 + q_{41}F_4 + \dots \\ F_2 = q_{12}F_1 + q_{32}F_3 + q_{42}F_4 + \dots \\ F_3 = q_{13}F_1 + q_{23}F_2 + q_{43}F_4 + \dots \end{cases}$$

Si se conoce que F_j es mayor que el resto de los F_i entonces el primer grupo de ecuaciones puede simplificarse a

$$q_{1j} + q_{2j} + q_{3j} + \dots = 1$$

para un sistema crítico o

$$q_{1j} + q_{2j} + q_{3j} + \dots < 1$$

Para un sistema subcrítico, siempre que, en cada caso, estas condiciones se satisfagan para todos los valores de j , o sea para todas las piezas del conjunto.

Otra manera de enfocar el problema es planteando que un sistema de unidades interactuantes es subcrítico si por cada neutrón emitido por una pieza del conjunto se emiten en total menos de un neutrón desde las otras piezas. Esta condición es lo mismo que decir que

$$G_1 = q_{12}G_2 + q_{13}G_3 + q_{14}G_4 + \dots$$

$$G_2 = q_{21}G_1 + q_{23}G_3 + q_{24}G_4 + \dots$$

$$G_3 = q_{31}G_1 + q_{32}G_2 + q_{34}G_4 + \dots$$

$$\dots \dots \dots$$

tiene una solución para G_1, G_2, G_3, \dots distinta de aquella en que todos los $G_i = 0$

El conjunto será subcrítico si para todos los valores de j :

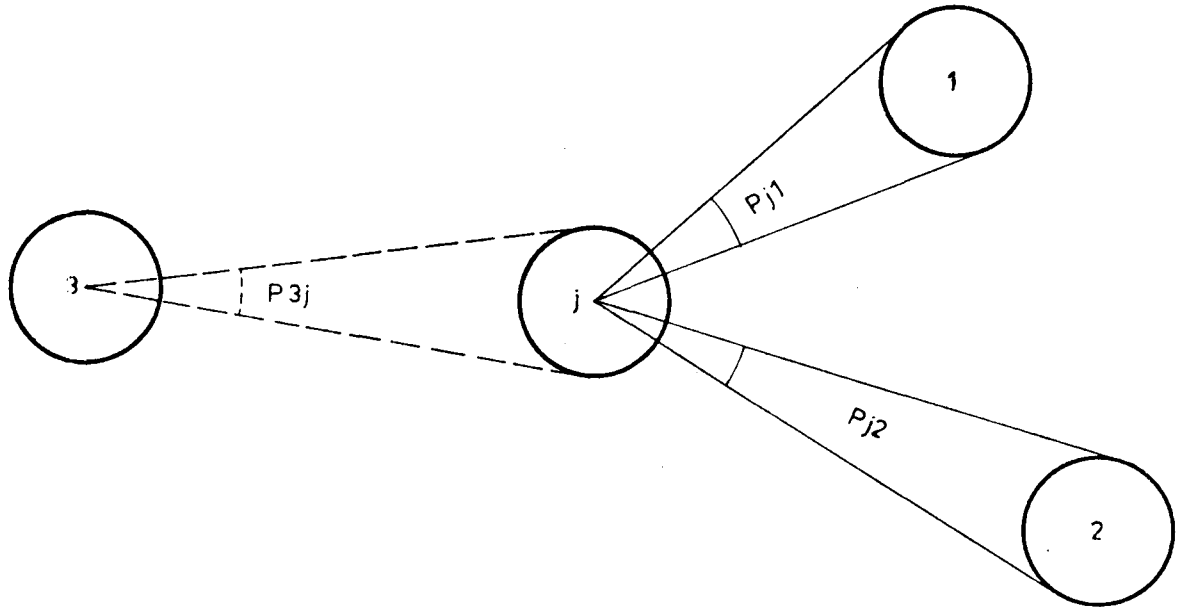
$$q_{j1} + q_{j2} + q_{j3} + \dots < 1$$

Si se tiene un conjunto espaciado por aire para el cual la mayor multiplicación es M , las condiciones se transforman en:

$$p_{1j} + p_{2j} + p_{3j} + \dots < \frac{1}{M}$$

$$p_{j1} + p_{j2} + p_{j3} + \dots < \frac{1}{M}$$

de las cuales la segunda, que es probablemente la más fácil de aplicar, establece simplemente que el ángulo sólido fraccional total subtendido en la pieza j por todas las otras piezas del conjunto debe ser menor que $\frac{1}{M}$.



En Oak-Ridge se desarrolló una teoría basada esencialmente sobre el mismo concepto pero midiendo la criticidad de cada pieza por medio de k de la teoría de reactores en lugar de usar la multiplicación superficial. En este caso la condición de criticidad es:

$$P_{j1} + P_{j2} + P_{j3} + \dots = \text{función de } k$$

Se han usado resultados experimentales para encontrar empíricamente la función de k y se incorporaron factores de seguridad grandes. La teoría ha encontrado dificultades porque la función $\frac{1}{M}$ no sólo depende de k sino también de la geometría y composición de cada pieza fisionable. Ese análisis es aplicable únicamente a conjuntos espaciados por aire pero las piezas individuales son lo suficientemente subcríticas y están separados como para asegurar aislación efectiva si el conjunto se inunda con agua. Este método tiene la ventaja de ser fácilmente aplicable y es válido para sistemas interactuantes de soluciones de U^{235} . La función de k está dada por:

$$\frac{6}{4\pi} \text{ para } k < 0.3$$

$$\frac{9 - 10k}{4\pi} \text{ para } 0.3 < k < 0.8$$

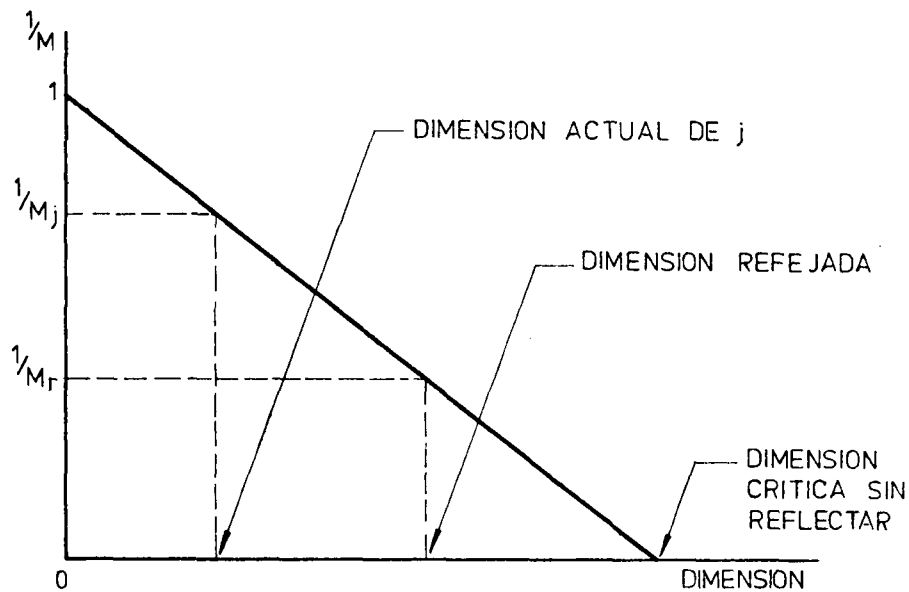
no es aplicable para $k > 0.8$

Estimación de los parámetros de interacción para conjuntos espaciados por aire

Por definición:

$$q_{ij} = P_{ij} \frac{M_j}{1 - R_j M_j}$$

Para un conjunto ideal espaciado por aire p_{ij} es el ángulo sólido fraccional Ω_{ij} subtendido en la pieza i por la pieza j y $M_j/1-R_jM_j$ se reduce a M_j , la multiplicación superficial de la pieza j . Puede estimarse M_j a partir de las dimensiones críticas sin reflector asociada con piezas idénticas a la j . Se dibuja un gráfico lineal entre $\frac{1}{M} = 0$ para la dimensión crítica y $\frac{1}{M} = 1$ para la dimensión 0, que permite una primera aproximación de M_j



Esta aproximación se corrige para permitir todas las variaciones posibles en la energía del neutrón incidente:

$$M_j = M_j' + 1$$

Muy pocos conjuntos de este tipo encontrados en la práctica son ideales, a menudo es necesario hacer una corrección por el efecto de apantallamiento de pequeñas cantidades de material interpuesto entre las piezas fisiónables interactuantes. Para ello se multiplica el ángulo sólido por un factor exponencial $e^{-\alpha x}$ donde x es el espesor y α el factor de atenuación característico del medio.

También se deben tener en cuenta los efectos de los reflectores. Si se conoce la dimensión crítica totalmente reflejada de piezas de igual forma y material que j , entonces $1/M_r$, el valor correspondiente de $1/M$, es $1/M_r = R_\infty$

donde R_∞ es la reflexión correspondiente a un reflector infinito del material en cuestión. A menudo es apropiado tomar el valor de reflexión de la pieza j como $0.9R_\infty$ en un sistema nominalmente espaciado por aire.

Aplicando esas dos correcciones al mismo tiempo =

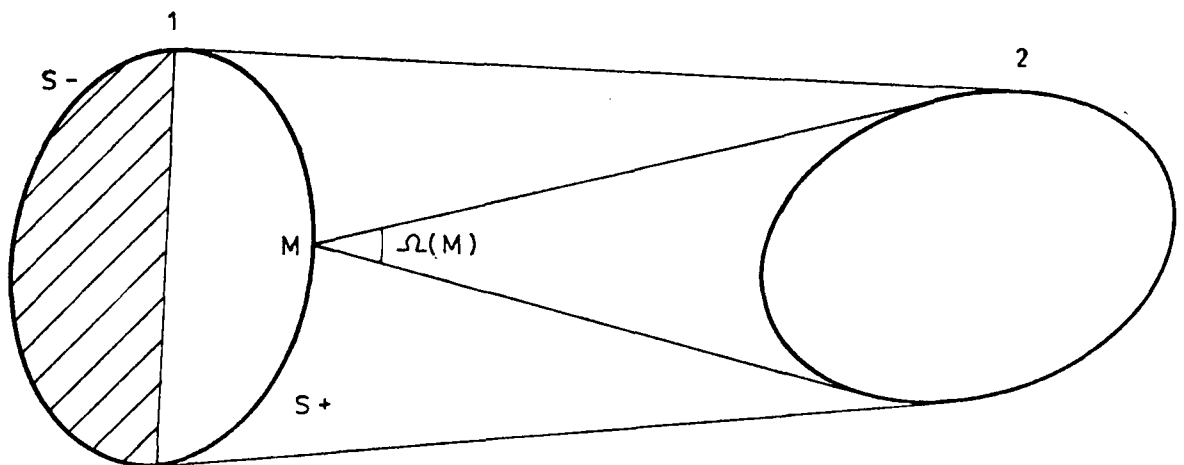
$$q_{ij} = \Omega_{ij} e^{-\alpha x} \left\{ \frac{M_j}{1 - \frac{0.9M_j}{M_R}} \right\}$$

Ángulos sólidos medios y fraccionales

La probabilidad de que un neutrón emitido por un medio multiplicador llegue a un recipiente vecino está ligado con el ángulo sólido bajo el que ve al recipiente. Se supondrá que todos los recipientes considerados están en aire y no reflejados.

Caso de dos recipientes

Se llama $\Omega(M)$ al ángulo sólido bajo el cual un punto M de la superficie del recipiente 1 ve al recipiente 2.



Se denomina ángulo sólido fraccional $\Omega_f(M) = \frac{\Omega(M)}{2\pi}$

Si el punto M está sobre la porción S de la superficie 1 es invisible desde 2, $\Omega(M)$ y $\Omega_f(M)$ serán cero.

Si se supone que la emisión de neutrones en la superficie de los recipientes es isótropa, $\Omega_f(M)$ representa la probabilidad de alcanzar el recipiente 2 para un neutrón que sale de M .

Ángulos sólidos medios

$$\bar{\Omega} = \frac{\int_S \Omega(M) dS}{\int_S dS} = \frac{\int_S \Omega(M) dS}{\int_S dS}$$

$\bar{\Omega}$ es el ángulo sólido medio bajo el que el recipiente 1 ve al 2.

El ángulo sólido fraccional medio es:

$$\bar{\Omega}_f = \frac{\int_S \Omega_f (M) dS}{\int_S dS} = \frac{\bar{\Omega}}{2\pi}$$

Suponiendo que los neutrones están uniformemente distribuidos en la superficie 1, el ángulo sólido fraccional medio $\bar{\Omega}_f$ representa la probabilidad que un neutrón que sale de 1 alcance 2.

Angulo sólido máximo

Para evitar el cálculo de integrales es cómodo definir un ángulo sólido máximo Ω_{\max} que es el máximo valor de $\Omega (M)$ sobre la superficie S_+ de tal forma que:

$$\bar{\Omega} = \frac{\int_{S_+} \Omega (M) dS}{\int_S dS} \leq \frac{\Omega_{\max} \int_{S_+} dS}{\int_S dS} = \Omega_{\max} \frac{S_+}{S}$$

Igualmente, se puede proceder con el ángulo sólido fraccional tomando un límite superior

$$\bar{\Omega}_f = \frac{\int_{S_+} \Omega_f (M) dS}{\int_S dS} < \frac{\Omega_{\max}}{2\pi} \frac{S_+}{S} = \Omega_{f\max}$$

El ángulo fraccional máximo $\Omega_{f\max}$ representa un límite superior de la probabilidad que un neutrón que sale de 1 alcance 2.

En el caso de dos esferas, dos cilindros infinitos paralelos, dos placas infinitas paralelas del mismo radio o espesor el factor S_+/S vale 1/2 y

$$\Omega_{f\max} = \frac{\Omega_{\max}}{4\pi}$$

En el caso general, esta fórmula dará lugar a errores despreciables, si las distancias entre recipientes no son muy pequeñas.

Caso de varios recipientes

En general se aísla un recipiente del sistema y se define un ángulo sólido total.

Si $\Omega^{j \rightarrow i}$ es el ángulo sólido medio bajo el que el recipiente j ve al i se define:

Angulo sólido total bajo el que i es visto desde los otros recipientes como:

$$\bar{\Omega}_{ti} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i \\ j=n}} \bar{\Omega}^{j \rightarrow i}$$

Angulo sólido fraccional correspondiente:

$$\bar{\Omega}_{fti} = \frac{\bar{\Omega}_{ti}}{2\pi}$$

$$\Omega_{fmaxti} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i \\ j=n}} \Omega_{max}^{j \rightarrow i}$$

Método del ángulo sólido límite

Parámetros de interacción

Se supondrá todos los recipientes en aire y sin reflector.

v_{ij} por definición es la probabilidad para un neutrón de dejar el recipiente i y alcanzar el j . Es la probabilidad por cada neutrón generado en la masa físil.

p_i es la probabilidad antifuga del recipiente i

$$v_{ij} = (1 - p_i) \bar{\Omega}_f^{i \rightarrow j}$$

Caso de dos recipientes

Se supondrá que las probabilidades de fuga de los recipientes no se modifican por la interacción.

Se supone, en un instante dado, que n_1 y n_2 son los neutrones que nacen en los recipientes 1 y 2

N son los neutrones secundarios que nacen en la generación siguiente como resultado de $n_1 + n_2$

N_{11} neutrones producidos en 1 a partir de n_1 , una parte de N_{11} está formada por los neutrones que se multiplican como si el recipiente 1 estuviese aislado o sea son $k_1 n_1$ y el resto son los neutrones producidos por la reflexión en el recipiente 2 de parte de los n_1 (por una o más reflexiones). Para tener en cuenta esto se escribe $N_{11} = k_1^* n_1$ k_1^* es el k_{ef} de 1 modificado por la presencia de 2.

Los n_1 neutrones van a emigrar en una proporción v_{12} al recipiente 2 y serán multiplicados por un coeficiente k_2^* que tiene en cuenta las reflexiones sobre 1

$$N_{12} = k_2^* v_{12} n_1$$

Se puede aplicar un razonamiento análogo a los neutrones procedentes de los n_2 .

Si N_1 y N_2 son los números totales de neutrones producidos en 1 y 2 se tendrá:

$$N_1 = N_{11} + N_{21} = k_1^* (n_1 + v_{21}n_2)$$

$$N_2 = N_{12} + N_{22} = k_2^* (v_{12}n_1 + n_2)$$

La fracción de los n_1 neutrones que sufrirá una reflexión simple sobre 2 es igual a $v_{12}v_{21}n_1$, después de multiplicarse en 1 será $k_1v_{12}v_{21}n_1$ neutrones, pero entre los que no son multiplicados, una parte igual a $v_{12}v_{21}(v_{12}v_{21}n_1)$ sufrirán una nueva reflexión sobre 2, etc. La parte de los n_2

que sufrirán una nueva reflexión de orden m sobre 2 es igual a $(v_{12}v_{21})^m n_1$ y producirán $(v_{12}v_{21})^m k_1 n_1$ neutrones.

$$k_1^* n_1 = k_1 n_1 \left[1 + v_{12}v_{21} + \dots + (v_{12}v_{21})^m + \dots \right]$$

$$k_1^* = \frac{k_1}{1 - v_{12}v_{21}}$$

Si la población del conjunto de los dos recipientes varía siguiendo una única ley exponencial, se puede expresar el k_{ef} global como:

$$K = \frac{N_1}{n_1} = \frac{N_2}{n_2}$$

El K efectivo global se define de una única manera en función de k_1 , k_2 y los parámetros de interacción.

Caso de recipientes idénticos

En este caso los dos recipientes tienen el mismo k efectivo aislado y además se supone que sus parámetros de interacción son iguales.

Entonces, por simetría $n_1 = n_2$ y los valores de k son iguales

$$k = k_1 = k_2 \quad v = v_{21} = v_{12}$$

$$K = k^* (1 + v) = \frac{k}{1 - v}$$

La relación que existe entre el coeficiente de multiplicación intrínseco de cada recipiente y el parámetro de interacción v , que depende principalmente de la posición relativa, es:

$$v = 1 - k$$

En la práctica se utiliza un límite superior de v en general Ω_f y se define $\Omega_1 = 1 - k$ como ángulo sólido fraccional límite.

La condición suficiente para mantener el conjunto sub-crítico es:

$$\Omega_f < \Omega_1$$

que es el criterio del ángulo sólido límite.

Estos criterios siempre se presentan como una desigualdad donde el primer miembro es función de las posiciones relativas de los recipientes y el segundo es un ángulo sólido límite, función de los coeficientes de multiplicación intrínsecos de los recipientes.

En el caso de dos recipientes distintos, a cada recipiente corresponde un k efectivo aislado y un correspondiente ángulo sólido límite.

Para este caso se deben verificar separadamente las dos condiciones:

$$\bar{\Omega}_f^{1 \rightarrow 2} \leq \Omega_{12}$$

$$\bar{\Omega}_f^{2 \rightarrow 1} \leq \Omega_{21}$$

el ángulo sólido bajo el que 1 ve a 2 debe ser inferior al ángulo sólido límite correspondiente a 2 y viceversa.

En el caso de n recipientes, a cada recipiente i le corresponde un k efectivo aislado y un ángulo sólido límite Ω_{1i} ; para cada recipiente se debe verificar

$$\bar{\Omega}_{fti} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{j=n} \bar{\Omega}^{j \rightarrow i} \leq \Omega_{1i}$$

Es decir: el ángulo sólido total bajo el cual es visto cada recipiente desde todos los otros debe ser inferior al ángulo sólido límite correspondiente a ese recipiente.

Método del parámetro de interacción en la práctica

Piezas en un medio material

En este tipo de problema deben usarse los parámetros de interacción obtenidos en forma experimental correspondiente al menor espaciamiento.

Piezas fijas espaciadas por aire

Determinando la configuración geométrica del sistema y las características de todos los materiales que lo componen se utilizan valores de tablas para verificar la condición de seguridad del sistema.

Un procedimiento alternativo es calcular el ángulo sólido fraccional total subtendido en cada una de las piezas por todas las otras, teniendo en cuenta el apantallamiento y asegurar que sea menor que $(1 - RM)/M$, lo que es equivalente a usar el método de Oak-Ridge.

Si este procedimiento es muy restrictivo se escriben las ecuaciones de criticidad

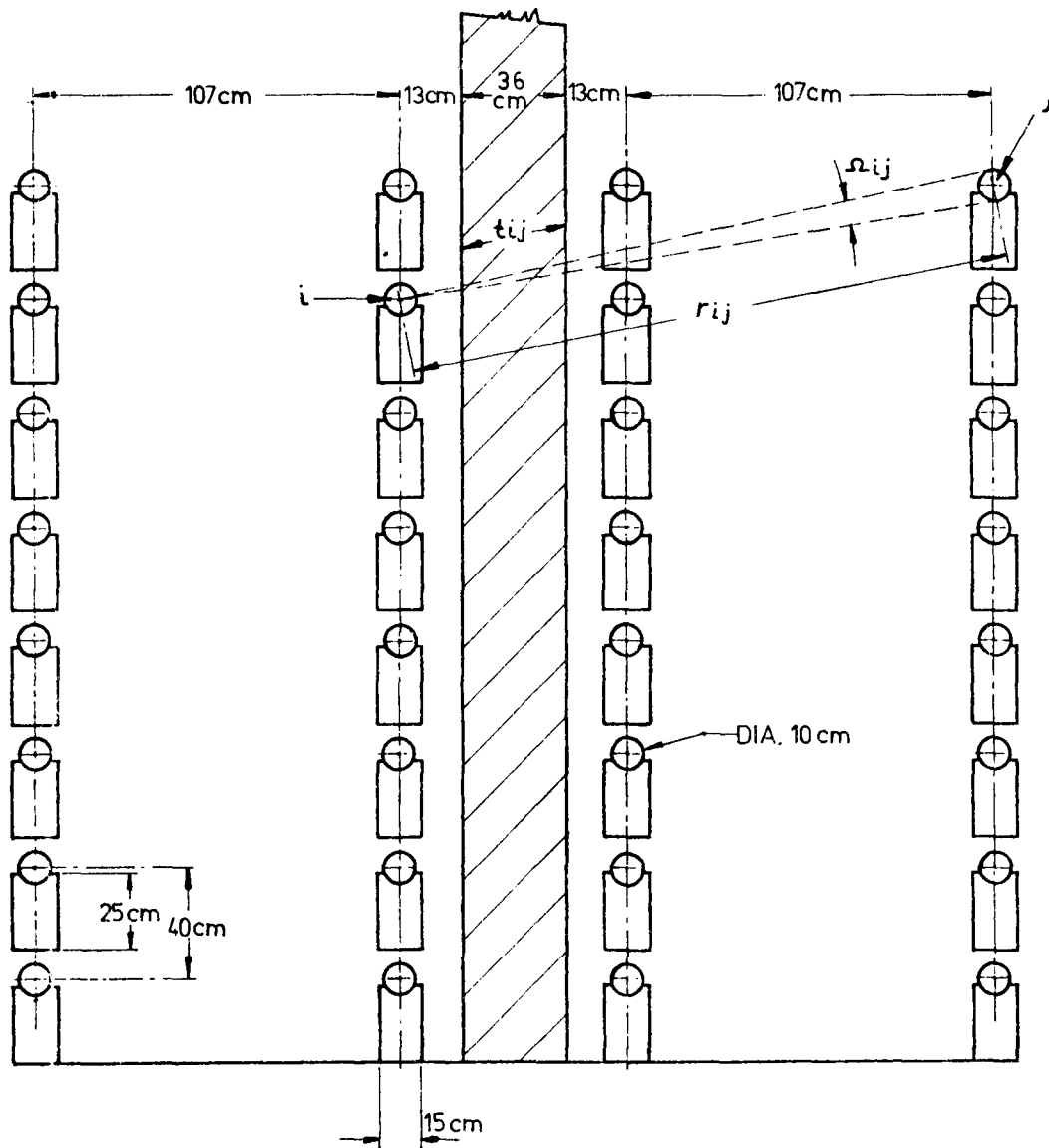
$$F_1 \cdot \frac{1 - RM}{M} = p_{21}F_2 + p_{31}F_3 + p_{41}F_4 + \dots$$

$$F_2 \cdot \frac{1 - RM}{M} = p_{12}F_1 + p_{32}F_3 + p_{42}F_4 + \dots$$

Se encuentra el menor valor de $\frac{1-RM}{M}$ para el cual estas ecuaciones tengan solución y se asegura que ese valor no se exceda en el conjunto.

Ejemplos de problemas de interacción

Almacenamiento de elementos combustibles



Las barras de combustible están ordenadas sobre estantes en cuatro filas de 8 barras cada una con un blindaje central de hormigón.

Las barras se consideran cilindros infinitos y al ángulo sólido Ω_{ij} subtendido por la barra j en la i se lo toma como $d/2\pi r_{ij}$. Para tomar en cuenta al blindaje, se mide el espesor t_{ij} del hormigón a lo largo de la distancia más corta que une las dos barras y la probabilidad p_{ij} se expresa como $\Omega_{ij} e^{-kt_{ij}}$ donde k es una constante.

Las ecuaciones de criticidad para este sistema serán:

$$\frac{1 - RM}{M} G_1 = p_{12}G_2 + p_{13}G_3 + \dots$$

.....

o sea

$$\frac{1 - RM}{M} G_1 = \Omega_{12} e^{-kt_{12}} G_2 + \Omega_{13} e^{-kt_{13}} G_3 + \dots$$

.....

Si se resuelve este sistema por medio de una computadora para encontrar $M/(1-RM)$ en términos de K se encuentra:

k [cm^{-1}]0	0.032	0.04	0.08	0.12	0.16	0.2
$\frac{M}{1 - RM}$	3.52	7.39	8.27	11.39	14.36	16.10	17.40

Si al hormigón empleado le corresponde $K < 0.08$ entonces el almacenamiento será seguro si:

$$\frac{M}{1 - RM} < 11.89$$

o sea $M < 11.89 (1 - RM)$

Suponiendo una reflexión del 50 % o sea $MR = 0.5$

$$M < 5.945$$

Esto se asegurará requiriendo que cada barra sea segura en forma individual cuando está totalmente reflejada por agua.

Mezclas y soluciones de $\text{UO}_2\text{F}_2/\text{H}_2\text{O}$ en cilindros

Se consideró un número infinito de cilindros ubicados en aire distribuidos en una red con sus ejes paralelos, que contienen la mezcla o solución de $\text{UO}_2\text{F}_2/\text{H}_2\text{O}$ que da el menor radio crítico.

El radio de los cilindros es el crítico si están totalmente reflejados por agua y los contenedores son despreciables como blindaje. Se calcularon los valores de la distancia mínima centro a centro en relación con los diámetros para distintos porcentajes de reflexión y enriquecimiento.

Los valores se dan en la tabla siguiente

Enriquecimiento %	N°de cilindros interactuantes			
	3	5	10	50
MR =0.5(reflejado 50%)				
100	2.0	3.4	5.0	8.5
65	1.9	3.3	4.8	8.3
28	1.8	3.1	4.6	7.9
5	1.7	2.9	4.2	7.2
1	1.7	2.8	4.1	6.9
MR =0.9(reflejado 90%)				
100	7.6	14.7	22.7	40.6
65	7.4	14.3	22.0	39.3
28	7.2	13.6	20.9	37.3
5	6.4	12.3	18.9	33.6
1	6.2	11.8	18.2	32.3

III.1.5 Análisis de problemas prácticos de Prevención de Criticidad

Sistemas metálicos

Generalmente, los problemas que se presentan son:

- (a) Seguridad de unidades aisladas bajo cualquier circunstancia previsible como por ejemplo: rotura del molde en una operación de fundición, inundación, compresión, etc.
- (b) Interacción de unidades individualmente seguras.

Seguridad de unidades aisladas

La evaluación de la seguridad por criticidad de unidades aisladas utiliza los conceptos enunciados en los capítulos anteriores. Primero se debe decidir la peor configuración posible donde se incluyen factores tales como eventuales reflexiones por presencia de operadores, inundaciones por roturas en los sistemas de refrigeración, formas que resultarían de roturas de los moldes de fundición etc.

Después de considerar todos estos factores se trata de demostrar que ese sistema es al menos tan seguro como otro para el que ya se ha demostrado su subcriticidad. Por ejemplo, se puede demostrar que la masa máxima involucrada es menor que la masa crítica mínima en las mismas condiciones.

Seguridad en conjuntos de unidades aplicando los criterios de los parámetros de interacción

El parámetro de interacción q_{ij} para un cuerpo (i) visto desde otro cuerpo (j) del conjunto se define como el número total de neutrones salientes inducidos en i cuando sale un neutrón de j y cuando no hay interacción con otro cuerpo en el camino.

F_j es el número total de neutrones salientes de j, entonces el número de neutrones salientes de i debidos al cuerpo j es $q_{ij}F_j$. Así definido q_{ij} puede representarse como el producto de la probabilidad p_{ij} de que un neutrón que deja j llegue a i sin interactuar en otro cuerpo y por la multiplicación superficial M_s del cuerpo i. Sean F_i y F_i' los neutrones salientes del cuerpo i aislado y en el conjunto respectivamente; entonces:

$$\left. \begin{aligned} F_1' &= F_1 + q_{12}F_2' + q_{13}F_3' + \dots + q_{1n}F_n' \\ F_2' &= q_{21}F_1' + F_2 + q_{23}F_3' + \dots + q_{2n}F_n' \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

La condición de criticidad es:

$$D = \begin{vmatrix} -1 & q_{12} & q_{13} & \dots & q_{1n} \\ q_{21} & -1 & q_{23} & \dots & q_{2n} \\ q_{n1} & q_{n2} & q_{n3} & \dots & -1 \end{vmatrix} = 0 \quad (2)$$

El grado de criticidad de un conjunto se puede calcular si se conocen todos los q_{ij}

Soluciones aproximadas de la ecuación (2)

Solución A:

Si se reemplazan los valores de q_{ij} por el mayor valor, q_{max} , se está sobreestimando el número de unidades para los que el conjunto es seguro; en esta condición

$$D = (-1)^{n-1} (1+q_{max})^{n-1} \left[(n-1) q_{max}^{-1} \right]$$

y para sistemas subcríticos

$$(n - 1) q_{max} < 1$$

Solución B

Cuando hay estado crítico los flujos pueden mantenerse en ausencia de fuentes y las ecuaciones (1) toman la forma:

$$F_i' = \sum_{\substack{j \\ j \neq i}} q_{ij} F_j'$$

Se supone que el cuerpo x tiene la mayor emisión de neutrones; entonces:

$$F_i' \leq F_x' S_i; \text{ donde } S_i \equiv \sum_j q_{ij}$$

en particular

$$F_x' \leq F_x' S_x$$

o sea

$$S_x > 1$$

Entonces, en estado crítico al menos uno de los valores S debe ser mayor o igual que uno, y la condición suficiente para que el sistema sea subcrítico es:

$$S_{max} = \max_i (S_i) < 1$$

Método general de control de la criticidad basado en el k_{ef}

El principio fundamental del control de la criticidad de una unidad o de varias en interacción se basa en el control del k_{ef} de cada una de ellas.

Se entiende por unidad un sistema que se asimila a una forma geométrica simple (esfera, cilindro, paralelepípedo) conteniendo una sal o una solución de material físil. También puede estar formada por piezas metálicas en procesamiento, de formas mal definidas pero donde se conoce el pe

so total del material físil.

A cada unidad considerada aislada le corresponde un k_{ef} , que de alguna manera es una medida de su nivel de seguridad. Si hay dos unidades que interactúan aumenta el k_{ef} de cada una de ellas.

En el caso de una unidad aislada, es decir que no interactúe con otras unidades, si el k_{ef} tomado en determinadas condiciones es inferior a uno se dice que la unidad es segura ya que es subcrítica.

Para una unidad en un conjunto, el k_{ef} debe ser suficientemente inferior a uno, como para que su aumento debido a la interacción con las otras unidades no lo haga superior a uno.

Noción de control de k_{ef} : control por un solo parámetro- control por varios parámetros

El valor de k_{ef} depende de los siguientes parámetros: el enriquecimiento, la masa, la geometría, el volumen, la moderación, la concentración, la densidad, la reflexión, el envenenamiento, la heterogeneidad y la temperatura.

Si se hace variar uno de los parámetros entre límites fijos y razonables el k_{ef} toma un valor máximo que depende a su vez de los valores de todos los demás parámetros.

Si se hacen variar todos los parámetros, cada uno de ellos en un dominio bien definido por límites iniciales, el k_{ef} pasa por un máximo maximorum para valores bien definidos de cada parámetro.

Estos valores se llaman pesimistas. Si se aparta uno o varios parámetros de sus valores pesimistas el k_{ef} disminuirá. Fijando uno o varios parámetros en valores arbitrarios se determinará un valor máximo de k_{ef} que corresponde a nuevos valores pesimistas del resto de los parámetros.

Si partiendo del valor máximo maximorum de k_{ef} se hace variar un sólo parámetro manteniendo los otros en sus valores pesimistas, el k_{ef} decrecerá y se podrá fijar un dominio restringido de ese parámetro, (llamado parámetro de control) de modo de tener $k_{ef} < k_1 < 1$. En otras palabras si el parámetro de control varía en un dominio restringido los otros parámetros podrán tomar cualquier valor entre límites fijos y siempre se tendrá $k_{ef} < k_1 < 1$.

Si la seguridad de una unidad se determina por el control de un solo parámetro, queda entendido que los otros parámetros se mantienen entre sus límites iniciales.

Igualmente se podrán definir dominios de variación restringidos para dos o más parámetros y la seguridad se determina por control de dos o varios parámetros.

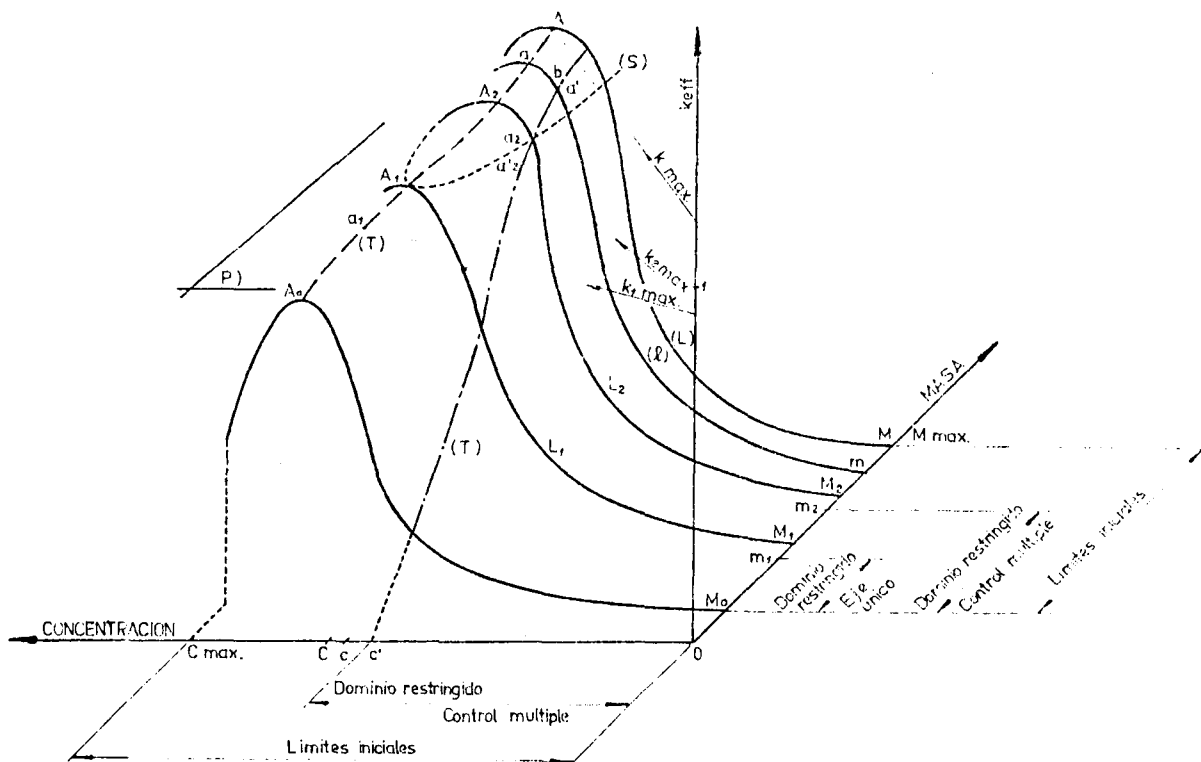
Ejemplo: Se razonará en un espacio de tres dimensiones donde se supone que el k_{ef} depende sólo de dos parámetros: masa y concentración

1) límites iniciales

Se supone que la masa puede variar entre M_0 y M_{max} ; por ejemplo, en una planta de tratamiento de sal de ^{235}Pu el dominio M_0 podrá ser la masa mínima que no puede evitarse o

bien ser cero y M_{\max} la masa total en proceso.

Se supone por otra parte que en el proceso aparecen distintas concentraciones de manera que no se pueden fijar a priori límites iniciales de la concentración que podrá variar entre 0 y C_{\max} (concentración de la sal seca).



Cada uno de los parámetros varía en los dominios definidos, el k_{ef} admite un valor máximo maximorum k_{\max} en el punto A para los valores M y C de masa y concentración; estos son los valores pesimistas. Si se aparta la concentración de su valor pesimista el k_{ef} disminuirá siguiendo la curva L donde el máximo es A. Si se fija la masa en otro valor m el k_{ef} variará siguiendo la curva l y existe una nueva concentración pesimista c, para el cual el k_{ef} es máximo en el punto a.

Si ahora se hace variar en forma continua la masa de M a M_0 la concentración tomará los correspondientes valores pesimistas, el k_{ef} variará siguiendo la porción de curva Γ limitada por los puntos A y A_0 y pasando por los máximos de las curvas L, l, L_1, L_2 ; el máximo de la curva Γ es el máximo maximorum A .

Sea P un plano de $k_{ef} = 1$ que corta a la superficie en estudio según la curva S que es la curva de la masa crítica en función de la concentración. A_1 es el punto en que corta Γ y L_1 es la curva del tipo l que pasa por A_1 y corresponde a un valor de la masa M_1 .

Control por un solo parámetro

El plano P separa el espacio en dos regiones; una supercrítica en la que se encuentra la parte A_1A de la curva Γ y una región subcrítica en la que se encuentra la parte A_0A_1 de la curva Γ . Si se impone a la masa de la unidad un dominio restringido de variación (M_0, m_1) con $m_1 < M_1$ la curva Γ estará limitada por los puntos A_0 y a_1 y el máximo relativo de k_{ef} será $k_{1max} < 1$.

Se ve que se puede mantener el k_{ef} de la unidad siempre inferior a 1 por el sólo hecho de imponer que la masa esté en un dominio restringido de variación (M_0, m_1) .

De este modo la masa es el parámetro de control.

Control por varios parámetros

Se supone que el límite m_1 es muy severo, entonces se impone un límite a la concentración de valor c' .

Si la masa tiene un valor fijo m , el k_{ef} variará sobre una porción de la curva l dentro del intervalo $(0, c')$ y limitado por el punto b . Esta porción de curva tiene un máximo en a' . En este punto k_{ef} es máximo para el valor pesimista c' de la concentración.

Si m varía en forma continua desde M_0 a M y la concentración se mantiene en su valor pesimista (c') el máximo relativo de k_{ef} describirá una curva Γ' .

Sea a_2' el punto donde Γ' corta a S y L_2 la curva (l) que pasa por a_2' (correspondiente a un valor M_2 de la masa); la unidad de masa M_2 y concentración c' es crítica y será suficiente imponer un límite inferior a la masa de la unidad $m_2 < M_2$; el k_{ef} máximo de la unidad será $k_{2max} < 1$.

Se mantiene el k_{ef} de la unidad inferior a 1 (subcrítico) imponiendo simultáneamente que la masa y concentración se mantengan en sus dominios restringidos (M_0, m_2) y $(0, c')$.

Se recuerda que en la práctica sólo ciertos parámetros pueden ser utilizados como parámetros de control; el resto de los parámetros se los fijará en sus valores pesimistas, ya sea de forma absoluta o de acuerdo al problema en estudio; estos son el enriquecimiento, reflexión, heterogeneidad, temperatura.

Los parámetros que se utilizan como control son: la masa,

el volumen, la geometría, la concentración, la moderación, la densidad y el envenenamiento.

Principio de la doble eventualidad

La existencia de un dominio restringido de variación para uno o varios parámetros permite obtener normas menos restrictivas teniendo en cuenta que en ese caso se excluye la posibilidad de que algunos de los parámetros de control adopten valores pesimistas. La subcriticidad de un sistema no estará asegurada si accidentalmente estos parámetros salen de sus dominios de variación.

Se deben definir cuidadosamente los dominios de variación y tener en cuenta los posibles accidentes.

Para ello se utiliza el principio de la doble eventualidad: un sistema que contiene material fisil debe ser concebido de forma tal que será necesario que se produzcan simultáneamente dos eventos improbables e independientes para hacer posible un accidente crítico.

Si la salida de un sólo parámetro de su dominio restringido hace que el valor de esa probabilidad sea grande se debe aplicar el principio de la doble eventualidad a la definición del dominio restringido. Por ejemplo; una caja que contiene gran cantidad de una sal seca de material fisil puede hacerse crítica si penetra agua en ella; en ese caso se podrá preveer una caja estanca. Un posible accidente será una inundación por una parte y una unión de estanqueidad defectuosa por otra.

Si ahora, para tener la posibilidad de un accidente es necesario que dos parámetros salgan de sus dominios de restricción y que ese hecho sea producto de dos eventos independientes, se podrá ser menos severo en la definición de cada dominio restringido.

En el ejemplo anterior puede restringirse la masa de material fisil a un valor inferior a la masa crítica mínima a la concentración pesimista; en ese caso un accidente posible será la consecuencia de un doble cargamento por una parte y una inundación por otra. Para tener el mismo grado de seguridad que en el caso anterior no es necesario tener una caja estanca.

Coficiente de seguridad

Es necesario utilizar coeficientes de seguridad en la definición de los dominios restringidos por las incertidumbres de los cálculos, el efecto de la heterogeneidad continua y las incertidumbres geométricas y operacionales.

Los coeficientes de seguridad (α) tienen distintos valores de acuerdo al parámetro de control que se utilice; en general las incertidumbres debidas a los cálculos se evalúan en aproximadamente 15%, los efectos debidos a heterogeneidades continuas en la concentración (gradientes de concentración) son de 10 % para el volumen y 15 % para la masa.

Es aconsejable utilizar los valores de α que tienen en cuenta los efectos de heterogeneidad, excepto en los casos en que por su misma naturaleza haga imposible su existencia,

	Masa	Volumen	Diámetro de cilindro	Espesor de placa	Concentración
Incertidumbres en los cálculos	15%	15%	1/2 Y 15%	15%	
Efecto de heterogeneidad	15%	10%	10%	10%	15%
α utilizable si es posible la existencia de heterogeneidad continua	0.7	0.75	0.85	0.75	0.85
α_{max} si no existe la posibilidad de heterogeneidad continua	0.85	0.85	0.9	0.85	

Estos valores de los coeficientes de seguridad se podrán modificar en cada caso para tener en cuenta, por ejemplo errores operacionales o errores de construcción. En particular, en el caso de seguridad por la masa, si puede haber un doble cargamento como resultado de una sola eventualidad, se utilizará un coeficiente de seguridad de 0.43.

Aplicación de las normas a unidades aisladas.

Existen dos criterios de definición para las normas: uno es considerar los valores críticos de los parámetros y al valor obtenido multiplicarlo por el coeficiente de seguridad. El otro consiste en considerar los valores, límite del parámetro donde ya se incluye el coeficiente de seguridad, o sea $P_1 = \alpha P_c$ siendo

P_1 = valor del límite del parámetro

α = coeficiente de seguridad

P_c = valor crítico

Es importante fijar cuáles son los valores pesimistas de parámetros tales como el enriquecimiento, la reflexión, el envenenamiento y la heterogeneidad para luego establecer el valor de los parámetros de control.

El valor pesimista del enriquecimiento es 100 % en U^{235} o Pu^{239} ya que el k_{ef} aumenta con el enriquecimiento.

Para reflexión el valor pesimista será el de un reflector infinito de agua (30cm) a menos que se trate de reflectores

más eficaces como berilio o grafito, en cuyo caso el valor pesimista estará dado para ese reflector. La heterogeneidad no puede ser un parámetro de control; en ciertos casos los medios heterogéneos son más reactivos que los homogéneos; en esos casos el valor pesimista de la heterogeneidad será el de una red regular de metal en agua. Para enriquecimientos mayores del 10% se supone medio homogéneo. Para enriquecimientos entre 5 y 10% se considera el medio como homogéneo si se trata de una seguridad por masa; para toda seguridad basada en la geometría convendrá aplicar las normas de medios heterogéneos. Para enriquecimientos menores del 5 % siempre se toman las normas correspondientes a la homogeneidad o heterogeneidad del medio. En el caso de envenenamiento es necesario estudiar cada caso en particular. El envenenamiento pesimista es nulo. En el caso de unidades de geometría imprecisa la geometría pesimista considera la unidad como una esfera.

Normas de masa

Si se consideran los valores pesimistas, para la geometría, la reflexión y el envenenamiento o sea respectivamente: esfera, reflector efectivamente infinito de agua y envenenamiento nulo se puede determinar una curva de masa crítica en función de la concentración para cada enriquecimiento. Para cada enriquecimiento existe un valor óptimo de la concentración o del grado de moderación que da la menor masa crítica.

Se obtendrá la seguridad total por control de la masa manteniendo la masa de la unidad inferior a la masa límite para esa concentración pesimista ($m_1 = \alpha_m m_c$) y el enriquecimiento en el 100 %.

En esas condiciones, cualesquiera que sean los otros parámetros la unidad no se convertirá en crítica.

En el caso de unidades donde el enriquecimiento está fijado, las normas a utilizar corresponderán a ese valor de enriquecimiento.

Si se puede controlar la concentración en un cierto dominio de variación no se considera la concentración pesimista y la unidad tendrá seguridad limitada.

Normas de volumen

Existen curvas de volumen crítico en función de la concentración para cada valor del enriquecimiento que presentan un mínimo para una concentración o grado de moderación óptimo.

Los volúmenes críticos mínimos permiten definir una seguridad total por volumen.

Normas de geometría

Se definen en base a curvas de dimensión geométrica (radios o espesores) en función de la concentración o del grado de moderación de forma similar a las normas de masa y volumen.

Normas de concentración

Para un dado enriquecimiento existe un valor de concentración por debajo del cual es imposible alcanzar las condiciones críticas, aunque el medio sea infinito. Esto se debe a que prevalece la absorción por el hidrógeno y el k_{∞} del medio es siempre inferior a 1.

Una seguridad total se basará en el máximo de concentración para el enriquecimiento pesimista.

Seguridad de un conjunto

Se basa en dos criterios; criterio individual y colectivo. Criterio individual: cada unidad aislada del conjunto debe ser segura con un reflector infinito de agua.

Criterio colectivo: debe basarse en la determinación de un ángulo sólido límite para cada unidad y comparar los ángulos sólidos reales con el ángulo sólido límite.

Aplicación a la concepción de las instalacionesDefinición de los parámetros de control

En el proyecto de una instalación se conocen los valores de los enriquecimientos máximos de los materiales fíisiles; esos valores se adoptarán para la elección de las normas a utilizar.

Enriquecimiento:

En ciertos casos se puede dividir la instalación en subconjuntos y aplicar las normas correspondientes al enriquecimiento máximo de cada subconjunto; esto implica un control riguroso del movimiento de los materiales fíisiles entre los subconjuntos.

Reflexión:

En general no se descarta la posibilidad de una eventual inundación y se conservan las hipótesis de reflexión total para unidades aisladas.

Si existen unidades que por su configuración o situación no pueden ser inundadas se pueden aplicar normas menos severas.

Heterogeneidad:

Se necesita determinar si el material contenido en la instalación es homogéneo o si es necesario aplicar las normas de heterogeneidad.

Control geométrico y control operacional

Un control puramente geométrico (cada unidad está en seguridad total por su geometría) se basa en las restricciones de las dimensiones de las unidades (volumen, diámetro, espesor). No se impone ninguna restricción sobre otros parámetros característicos de la unidad; este tipo de control es el más seguro.

Se puede imponer un control puramente operacional sobre la masa de material fíisil presente, sus concentraciones y envenenamiento, sin restringir las dimensiones de la unidad. Este tipo de control involucra reglas administrativas es-

trictas que controlan las masas de los materiales fíisiles en movimiento, verifican sistemáticamente las concentraciones y la presencia de venenos por medio de muestras, etc. Este tipo de controles deberá evitarse debido a las deficiencias humanas y las imprecisiones de las medidas (en particular la concentración).

Existe la posibilidad de un control mixto donde se fijan las dimensiones de ciertas unidades, por ejemplo en función de un dominio restringido de variación de la concentración, donde éste sea garantizado por el procedimiento. Una vez elegido el tipo de control para cada unidad se definirá precisamente el o los parámetros de control entre:

- volumen
- diámetro
- espesor
- masa
- concentración
- envenenamiento

Definición de zonas

Para simplificar los estudios de interacción es útil definir en la instalación varias zonas aisladas neutrónicamente entre sí.

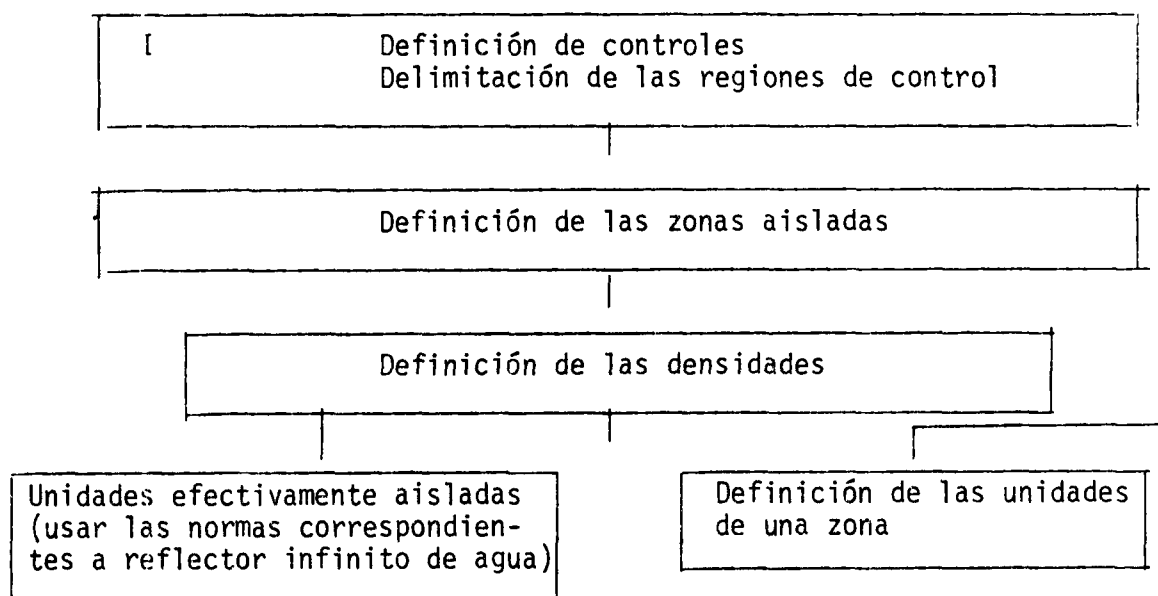
Definición de densidades

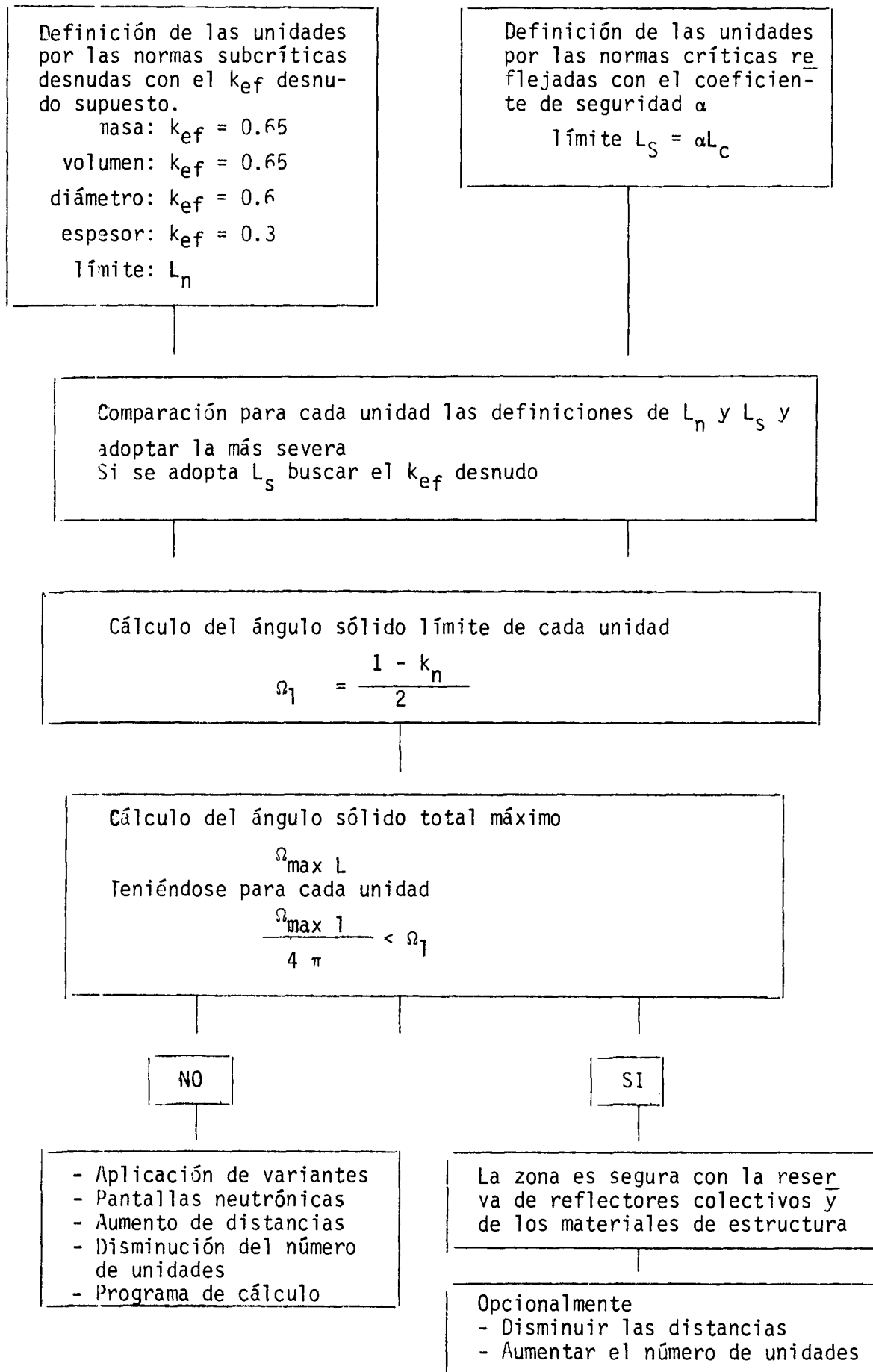
Es importante conocer la curva de densidad en material fíisil por unidad de volumen en función del grado de moderación H/X no sólo para los componentes tratados normalmente sino para los que puedan formarse en un accidente posible.

Definición de unidades

Se llamará unidad a un conjunto de elementos que por su configuración o su tratamiento se puedan considerar como una sola entidad.

El siguiente esquema resume el proceso seguido para efectuar el estudio de seguridad nuclear de una instalación.





Plantas químicas

Existen numerosos aspectos de criticidad en la manufactura de elementos combustibles y en procesamiento de combustible quemado.

Procesos empleados

La mayoría de los procesamientos y manipulación de material físil pueden clasificarse en 6 u 8 procesos unitarios. Probablemente el más importante de ellos sea la extracción con solventes en el cual una solución de uranio o sal de plutonio en agua es extraída con un solvente orgánico.

La sal disuelta en agua se transfiere parcialmente al solvente orgánico y se produce una distribución de material entre las dos fases líquidas.

Esta extracción de una etapa se repite varias veces en un sistema contracorriente en el cual el solvente pasa a través de una serie de etapas de contacto en una dirección y la solución acuosa pasa a través de la misma serie de etapas en dirección opuesta.

Una planta mezcladora-sedimentadora consiste en una cámara de mezcla en la cual se agitan dos líquidos y una cámara sedimentadora en la cual se permite la disposición para separar los dos líquidos. Estos pasan luego en dirección opuesta a los estados adyacentes. En la columna de extracción por solventes, los estados físicos no están delimitados pero el efecto de la serie de etapas es obtenido en un largo tubo en el cual las gotitas suben por los puntos de inyección en la base del tubo a través de la solución acuosa hasta el tope.

Otros procesos químicos comunes son, el contacto de sólido con gas o vapor como en la reducción de UO_3 a UO_2 con hidrógeno, o la conversión de UO_2 a UF_4 con HF. Un caso especial de este tipo de proceso es la conversión de UF_4 sólido a UF_6 líquido o vapor usando HF.

Sustancias químicas que aparecen en el proceso

El uranio metálico, dióxido de uranio (UO_2), tetrafluoruro de uranio (UF_4), hexafluoruro de uranio (UF_6), (U_3O_8) y trióxido de uranio (UO_3) son todas sustancias físicas pero esencialmente no moderadas cuando están puras.

Las sustancias moderadoras comunes se agrupan en cuatro grupos. Primero hidrógeno en agua, como en procesos de solución, agua refrigerante, ácido tales como sulfúrico o nítrico, etc. El segundo grupo contiene combinaciones químicas de hidrógeno como $(CH_2)_n$ como el kerosene, parafina, aceites lubricantes, etc.

El tercer grupo contiene hidrógeno en materiales orgánicos de composición más compleja como PVC, polietileno, madera. El cuarto grupo son compuestos de hidrógeno tales como ácido fluorídrico anhidro o ácido hidroc্লórico.

Búsqueda de la peor combinación por medio de las variables de operación

Para estudiar una instalación es necesario encontrar la combinación de variables que dará el sistema más reactivo. Tal estudio debe incluir las variaciones en las condiciones de operación y la posibilidad de formación de material insoluble. Por ejemplo: en la extracción de soluciones de uranio irradiado puede acumularse sílice asociado con plutonio; en los evaporadores por secado sobre superficies calientes o por precipitación de compuestos de plutonio insoluble puede producirse una capa de plutonio.

Siempre existe la posibilidad de cristalización de soluciones fuertes y a veces son necesarias la evaporación, cristalización y secado como en la preparación de oxalato de plutonio por evaporación de su solución y la descomposición térmica del oxalato al óxido.

Definición de áreas con control de criticidad.

Toda habilitación debe ser otorgada sólo después de considerar el posible transporte de material que entra o sale de la parte de la planta o del área.

Debe determinarse una frontera de cada planta o parte de la misma y debe considerarse el transporte de material a través de ella; se incluyen el transporte a través de cañerías, desagües, muestras sacadas por el personal y el traslado y transferencia de equipos al departamento de mantenimiento, así como los flujos de productos, materiales en bruto y residuos. El problema de determinar los flujos entrantes y salientes de un área es de suma importancia cuando la habilitación se basa en el control de masa del material fisible. Debe considerarse la custodia con que se sacan muestras y cuando son significativos, la exactitud del análisis para materiales fisibles, un adecuado registro del procedimiento y contabilidad.

Debe estimarse la acumulación de errores de contabilidad y por lo tanto en el material presente que se determina por la diferencia entre la entrada y salida de material. En base a esto se determina la frecuencia de inspección de acumulación en intervalos lógicos.

Debe aplicarse control de masa sólo cuando la persona responsable de ese control lo es también de su recepción.