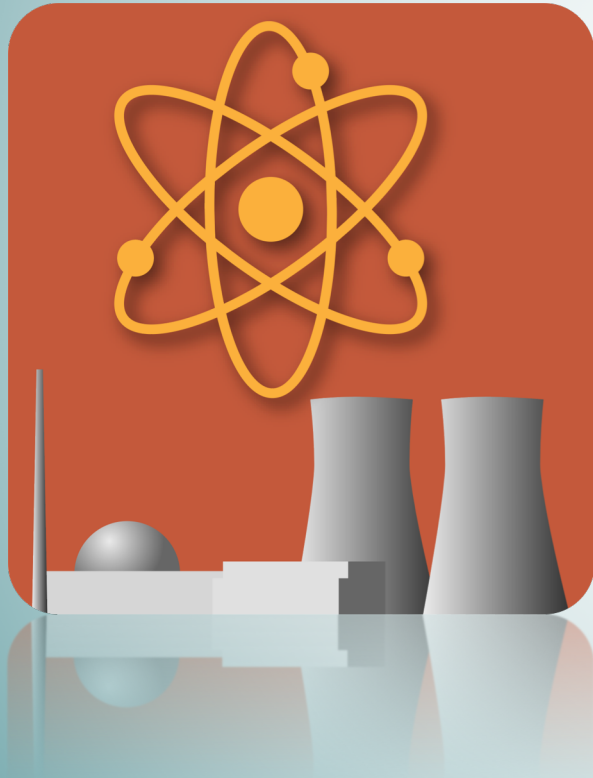


Ingeniería Nuclear

BLOQUE II. REACTORES

Lección 4. Secciones nucleares eficaces y flujo neutrónico



Fernando Delgado San Román

Raquel Martínez Torre

DPTO. DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



SNE Y FLUJO NEUTRÓNICO

INTRODUCCIÓN

- ❑ Los neutrones de fisión (neutrones rápidos):
 - ✓ Nacen con una energía promedio cercana a los 2 MeV.
 - ✓ Interactúan con los materiales del núcleo del reactor mediante reacciones de absorción y dispersión.
 - En las reacciones de dispersión, los neutrones se frenan, reduciendo su energía hasta niveles térmicos.
 - Los neutrones térmicos pueden ser absorbidos por núcleos fisibles produciendo más fisiones o ser absorbidos por materiales fértiles convirtiéndose éstos en combustible fisiónable.
 - La absorción de neutrones por parte de los materiales estructurales, refrigerante y otros materiales no combustibles da lugar a la eliminación de neutrones sin ninguna utilidad.
- ❑ La operación segura y eficiente de un reactor nuclear exige predecir la probabilidad de que se produzca una determinada reacción, de absorción o de dispersión. Una vez que se conocen estas probabilidades, si se puede determinar la disponibilidad de neutrones, se puede predecir el ritmo al que estas reacciones nucleares tienen lugar.

SNE Y FLUJO NEUTRÓNICO

DENSIDAD ATÓMICA

□ Número de átomos de un elemento determinado por unidad de volumen del material.

$$N = \frac{\rho N_A}{M}$$

$N \equiv$ densidad de átomos (at/cm^3)

$\rho \equiv$ densidad (g/cm^3)

$N_A \equiv$ número de Avogadro ($6.022 \times 10^{23} at/mol$)

$M \equiv$ peso atómico (g)

SNE Y FLUJO NEUTRÓNICO

SECCIONES EFICACES

- La probabilidad de que ocurra una determinada reacción neutrón-núcleo depende de dos factores:
 - ✓ Tipo de núcleo.
 - ✓ Energía de los neutrones: en la mayoría de los materiales, la absorción de un neutrón térmico es mucho más probable que la absorción de un neutrón rápido.
- La probabilidad de interacción neutrón-núcleo depende de un tercer factor:
 - ✓ Tipo de reacción implicada.
- La sección eficaz microscópica (σ)** de un núcleo para una determinada reacción es la probabilidad de ocurrencia de una determinada reacción entre un neutrón y un núcleo.
 - ✓ Variará con la energía del neutrón.
 - ✓ Puede ser considerada como el área efectiva que el núcleo presenta al neutrón para una determinada reacción.
 - Cuanto mayor sea el área efectiva, mayor es la probabilidad de ocurrencia de la reacción.
 - Se expresa en unidades de área, barnios → 1 barnio es 10^{-24} cm²
- En un volumen de material, la interacción de un neutrón dentro de él depende de:
 - ✓ Número de núcleos dentro de ese volumen.
 - ✓ La sección eficaz microscópica de los núcleos individuales.

SNE Y FLUJO NEUTRÓNICO

SECCIONES EFICACES

- ❑ La **sección eficaz macroscópica (Σ)** es la probabilidad de que una reacción dada se produzca por unidad de desplazamiento del neutrón.

$$\Sigma = N \cdot \sigma \quad \left\{ \begin{array}{l} \Sigma \equiv \textit{sección eficaz macroscópica} (cm^{-1}) \\ N \equiv \textit{Densidad atómico del material} \left(\frac{at}{cm^3} \right) \\ \sigma \equiv \textit{Sección eficaz microscópica} (cm^2) \end{array} \right.$$

- ❑ La sección eficaz microscópica total (σ_T) es la suma de:
 - ✓ Sección eficaz microscópica de absorción (σ_a): probabilidad de que un neutrón sea absorbido por un determinado átomo.
 - ✓ Sección eficaz microscópica de dispersión (σ_d): probabilidad de que un neutrón sea repelido por un determinado átomo.

$$\sigma_T = \sigma_a + \sigma_d$$

SNE Y FLUJO NEUTRÓNICO

SECCIONES EFICACES

□ Ambas secciones pueden dividirse en:

✓ σ_d : es la suma de la sección eficaz de dispersión elástica (σ_{de}) y la sección eficaz de dispersión inelástica (σ_{di}).

$$\sigma_d = \sigma_{de} + \sigma_{di}$$

✓ σ_a : incluye todas las reacciones, excepto las de dispersión. Sin embargo, para la mayoría de los propósitos, es suficiente separar dichas reacciones en dos categorías, las de fisión (σ_f) y las de captura radiativa (σ_c)

$$\sigma_a = \sigma_f + \sigma_c$$

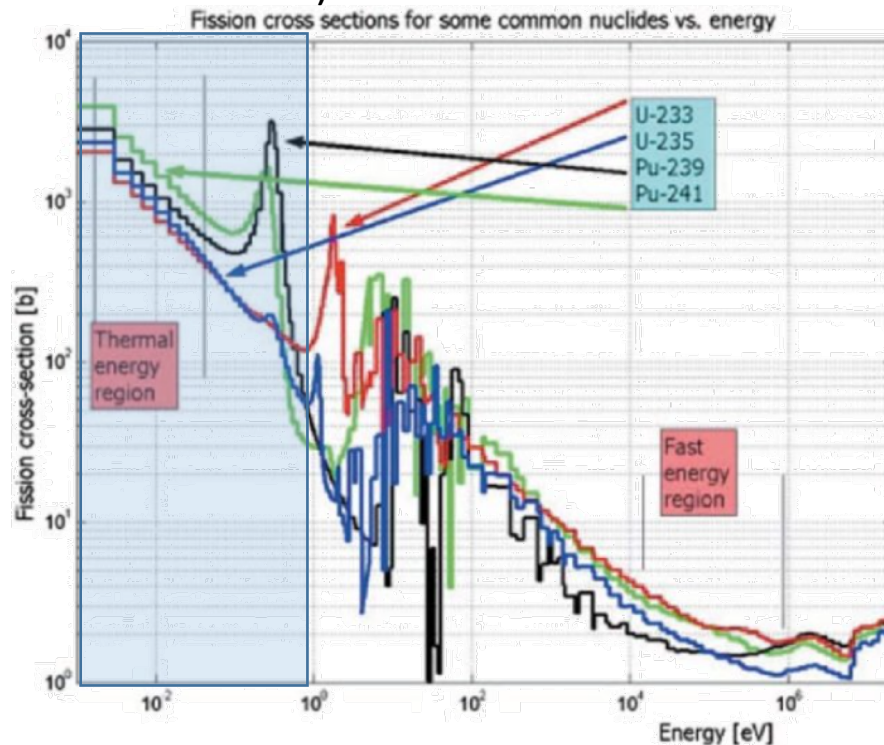
□ A menudo, el cálculo de la variación de las secciones eficaces de absorción con la energía del neutrón es complicado.

✓ Para muchos elementos, las secciones eficaces de absorción son pequeñas, variando desde una fracción de un barnio a unos pocos barnios para neutrones lentos (o térmicos).

SNE Y FLUJO NEUTRÓNICO

SECCIÓN EFICAZ DE ABSORCIÓN

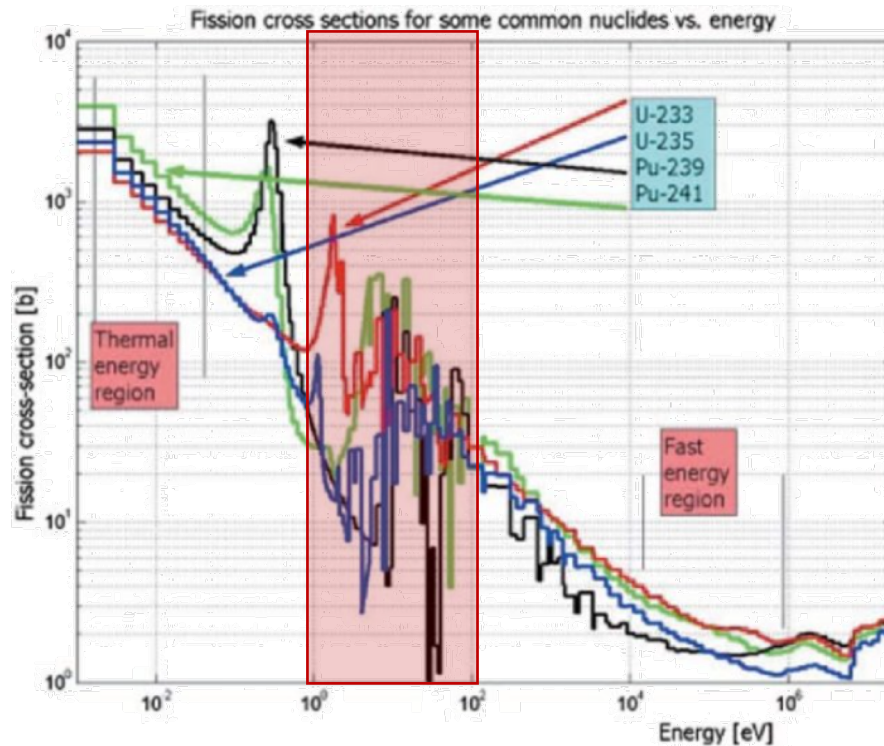
- Un examen de la variación de la sección eficaz de absorción (σ_a) con la energía del neutrón incidente en nucleídos con números másicos altos (o moderadamente altos) revela la existencia de tres regiones (curva σ_a – energía de los neutrones incidentes).



- Región 1/v:** en la región de baja energía, que incluye la gama térmica ($E < 1$ eV), la sección eficaz disminuye de manera constante con el aumento de energía de los neutrones.
 - Se denomina así porque en esta región la sección eficaz de absorción, que a menudo es alta, es inversamente proporcional a la velocidad (v), es decir, proporcional a $1/v$.

SNE Y FLUJO NEUTRÓNICO

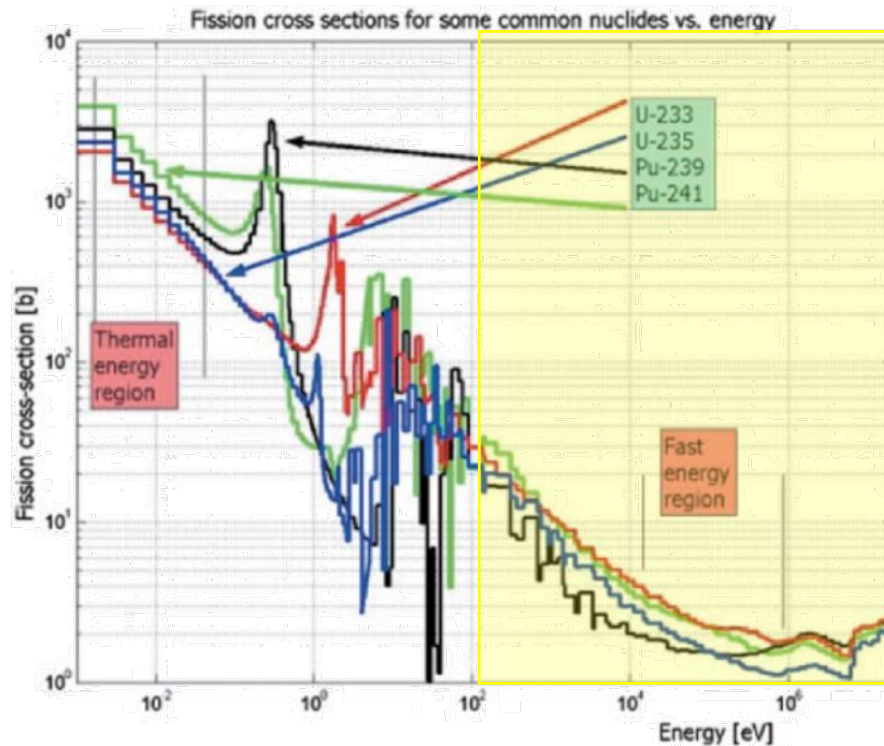
SECCIÓN EFICAZ DE ABSORCIÓN



- Región de resonancia:** las secciones eficaces se elevan bruscamente a valores altos, denominados picos de resonancia, que pertenecen a neutrones con ciertas energías, para inmediatamente caer. Estas energías se llaman energías de resonancia y son el resultado de la afinidad del núcleo con los neutrones cuyas energías coinciden estrechamente con sus niveles de energía discretos, cuánticos.

SNE Y FLUJO NEUTRÓNICO

SECCIÓN EFICAZ DE ABSORCIÓN



- 3. Región de los neutrones rápidos:** para energías neutrónicas más altas, la sección eficaz de absorción disminuye constantemente a medida que la energía de los neutrones aumenta. En esta región las secciones eficaces de absorción son, por lo general, menores de 10 barnios.

SNE Y FLUJO NEUTRÓNICO

SECCIÓN EFICAZ DE DISPERSIÓN

- ❑ Con la excepción del H, para el cual el valor es bastante grande, las secciones eficaces de dispersión elástica son generalmente pequeñas (entre 5 y 10 barnios).
 - ✓ La sección eficaz de dispersión potencial es esencialmente constante e independiente de la energía de los neutrones.
 - ✓ La dispersión elástica de resonancia y la dispersión inelástica muestran picos de resonancia similares a las secciones eficaces de absorción.
 - ✓ En general, las variaciones en las secciones eficaces de dispersión son muy pequeñas en comparación con las variaciones de las secciones eficaces de absorción.

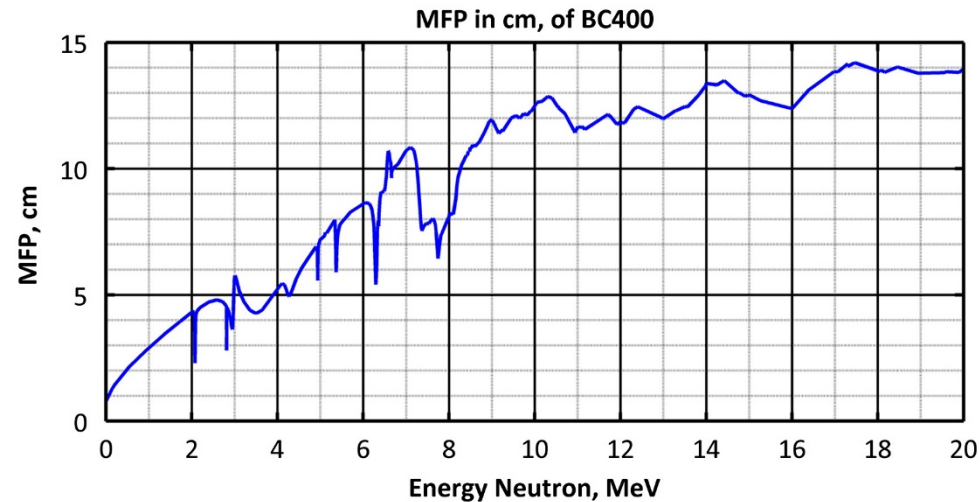
SNE Y FLUJO NEUTRÓNICO

RECORRIDO LIBRE MEDIO

- Es la distancia media recorrida por un neutrón antes de que sufra una determinada interacción.

$$\lambda = \frac{1}{\Sigma} \left\{ \begin{array}{l} \lambda \equiv \textit{recorrido libre medio} \\ \Sigma \equiv \textit{sección eficaz macroscópica} \end{array} \right.$$

- Si un neutrón posee una cierta probabilidad de sufrir una determinada interacción en un centímetro de desplazamiento, el inverso de este valor determinará cuanto se desplazará el neutrón (en valor promedio) antes de sufrir la interacción.



SNE Y FLUJO NEUTRÓNICO

CÁLCULO DE LA SECCIÓN EFICAZ MACROSCÓPICA Y DEL RECORRIDO LIBRE MEDIO

- ❑ La mayoría de los materiales se componen de varios elementos. A su vez, la mayoría de los elementos se componen de varios isótopos, por lo tanto, la mayoría de los materiales tienen muchas secciones eficaces, una por cada isótopo.
- ❑ De esta manera, para incluir todos los isótopos de un material es necesario determinar la sección eficaces macroscópicas para cada isótopo y luego sumarlas.

$$\Sigma = N_1\sigma_1 + N_2\sigma_2 + \dots + N_n\sigma_n \quad \left\{ \begin{array}{l} N_n \equiv n^{\circ} \text{ de núcleos por } cm^3 \text{ en el } n^{th} \text{ elemento} \\ \sigma_n \equiv \text{sección eficaz microscópica del } n^{th} \text{ elemento} \end{array} \right.$$

SNE Y FLUJO NEUTRÓNICO

EFFECTOS DE LA TEMPERATURA SOBRE LA SECCIÓN EFICAZ

- ❑ La sección eficaz de absorción varía significativamente con la energía de los neutrones.
- ❑ Por otro lado, la mayoría de las secciones eficaces proporcionadas en gráficas y tablas se realizan para una velocidad estándar de los neutrones de 2200 m/s, lo que corresponde a una temperatura ambiente de 20 °C (68°F).
- ❑ Por lo tanto, si el material se encuentra a una temperatura superior, la sección eficaz de absorción será menor que la determinada para 20°C. Cualquier sección eficaz de absorción (σ_a , σ_f , σ_c) ha de ser modificada con la temperatura con la expresión:

$$\sigma = \sigma_o \left(\frac{T_o}{T} \right)^{1/2}$$

$\left\{ \begin{array}{l} \sigma \equiv \text{Sección eficaz en función de la temperatura} \\ \sigma_o \equiv \text{Sección eficaz para } 20 \text{ }^\circ\text{C.} \\ T_o \equiv \text{Temperatura de referencia (20 }^\circ\text{C)} \\ T \equiv \text{Temperatura de cálculo} \end{array} \right.$

SNE Y FLUJO NEUTRÓNICO

FLUJO NEUTRÓNICO

- ❑ Si se quiere determinar cuántas reacciones neutrónicas se producen realmente, es necesario conocer el número de neutrones que viajan a través del material y su velocidad (cm/s).
- ❑ Es necesario calcular, en cualquier instante, el número de neutrones existentes en un cm^3 y la distancia total que viajan cada segundo en ese cm^3 .
 - ✓ Densidad neutrónica: número de neutrones existentes en un cm^3 de material en cualquier instante (Símbolo: n ; unidades: neutrones/ cm^3).
 - ✓ La distancia total que pueden recorrer estos neutrones en cada segundo será función de su velocidad.
- ❑ Determinación del flujo neutrónico (ϕ): recorrido total en un segundo de todos los neutrones contenidos en un cm^3 de material.

$$\phi = n \times v \quad \left\{ \begin{array}{l} \phi \equiv \text{flujo neutrónico} \left(\frac{\text{neutrones}}{\text{cm}^2 \times \text{seg}} \right) \\ n \equiv \text{densidad neutrónica} \left(\frac{\text{netrones}}{\text{cm}^3} \right) \\ v \equiv \text{velocidad del neutrón} \left(\frac{\text{cm}}{\text{seg}} \right) \end{array} \right.$$

SNE Y FLUJO NEUTRÓNICO

FLUJO NEUTRÓNICO

- ❑ En algunas aplicaciones, por ejemplo en la medida de la sección eficaz, el término flujo neutrónico significa haces paralelos de neutrones que viajan en una sola dirección.
- ❑ La intensidad (I) de un haz de neutrones es el producto de la densidad neutrónica por su velocidad media.
 - ✓ Unidad: número de neutrones por unidad de área y tiempo que atraviesa una superficie perpendicular a la dirección del haz: ((neutrones/(cm²Xseg))).
 - ✓ La distancia total que pueden recorrer estos neutrones en cada segundo será función de su velocidad.
- ❑ Se puede pensar que el flujo de neutrones de un reactor nuclear se compone de muchos haces de neutrones que viajan en diferentes direcciones.
 - ✓ Flujo de neutrones total: suma escalar de las intensidades de flujo direccionales.

$$\phi = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

- ✓ Todos los haces direccionales contribuyen a la tasa total de reacción ya que los átomos de un reactor no tienen una dirección preferente de interacción con los neutrones.
- ✓ En realidad, en un punto dado dentro del reactor, los neutrones van a viajar en todas las direcciones.

SNE Y FLUJO NEUTRÓNICO

RECURSOS

- Nuclear Physics and Reactor Theory, 1993 (Department of Energy United States of America).