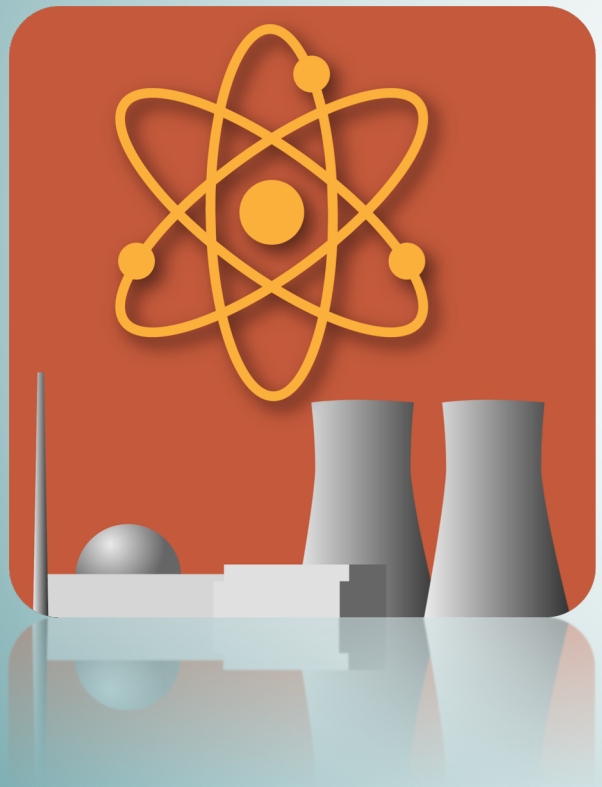
Ingeniería Nuclear

Bloque II. Reactores

Lección 1. Ciclo de vida del neutrón. Fórmula de los cuatro factores



Fernando Delgado San Román

Raquel Martínez Torre

Dpto. de Ingeniería Eléctrica y Energética

Este tema se publica bajo Licencia:

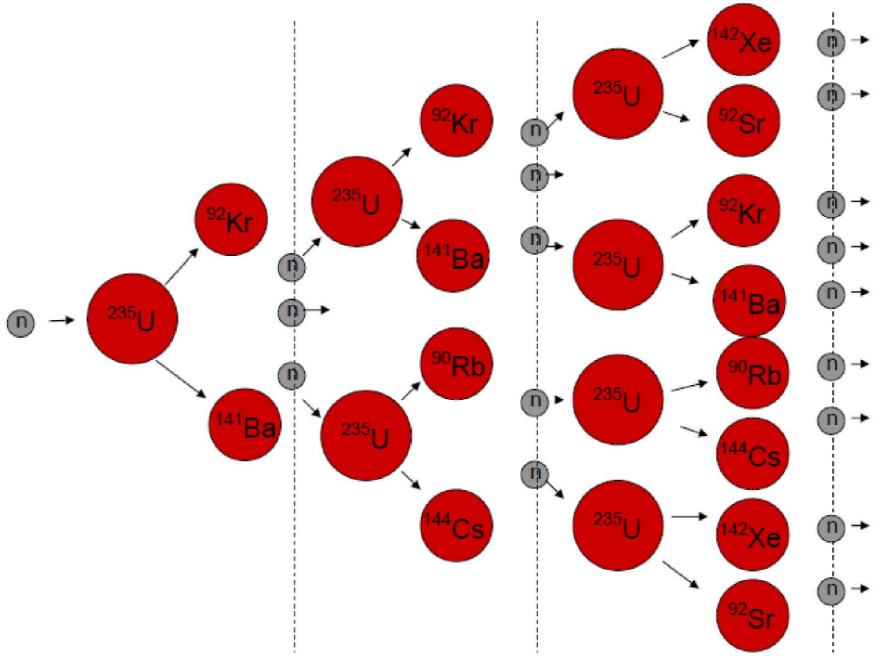
Creative Commons BY-NC-SA 4.0

Grado en Ingeniería de los Recursos Energéticos

CICLO DE VIDA DEL NEUTRÓN

FACTOR DE MULTIPLICACIÓN INFINITO

- No todos los neutrones producidos por fisión provocan nuevas fisiones, ya que:
  - ✓ Algunos de ellos son absorbidos por material no-fisionable.
  - ✓ Algunos son absorbidos parasitariamente por material fisionable sin provocar su fisión.
  - ✓ Algunos se fugan del reactor.
- No obstante, para el mantenimiento de una reacción en cadena auto-sostenible no es necesario que todos los neutrones producidos en la fisión produzcan una nueva fisión.
  - ✓ **Condición mínima**: cada núcleo fisionado debe producir, en promedio, al menos un neutrón que cause la fisión de otro núcleo.
  - ✓ El factor de multiplicación expresa adecuadamente esta condición.
- El número de neutrones absorbidos en o fugados del reactor determina el valor de del factor de multiplicación. También determina si una nueva generación de neutrones es mayor, menor, o del mismo tamaño que la generación anterior.



1ª Generación 2ª Generación 3ª Generación

Fuente: https://mitosnucleares.wordpress.com/2019/07/08/la-corta-vida-de-un-neutron/

CICLO DE VIDA DEL NEUTRÓN

FACTOR DE MULTIPLICACIÓN INFINITO

- Cualquier reactor de tamaño finito tendrá neutrones que se fugan de él.
- Generalmente, cuanto mayor sea el reactor, menor será la fracción de neutrones fugados.
- Cálculo del factor de multiplicación:
  - ✓ **Simplificación**: reactor infinitamente grande, y, por lo tanto, sin fuga de neutrones.
  - ✓ **Factor de multiplicación infinito**, $\boldsymbol{k_\infty}$: aumento o disminución del flujo de neutrones en un reactor infinito.
  - ✓ $\boldsymbol{k_\infty}$: ratio de los neutrones producidos por fisión en una generación entre el número de neutrones absorbidos en la generación anterior.

$$k_\infty = \frac{Producción\ de\ neutrones\ por\ fisión\ en\ una\ generación}{Neutrones\ absorbidos\ en\ la\ generación\ anterior}$$

CICLO DE VIDA DEL NEUTRÓN

FÓRMULA DE LOS CUATRO FACTORES

- Un grupo de neutrones rápidos producidos por fisión pueden participar en varias tipos de reacciones.
  - ✓ Algunas de estas reacciones reducen el número de neutrones.
  - ✓ Otras reacciones aumentan el número de neutrones o producen una segunda generación.
- Existen cuatro factores, completamente independientes de la forma y tamaño del reactor, que permiten calcular la capacidad inherente de multiplicación del combustible y del moderador, sin tener en cuenta las fugas.

$$k_\infty = \varepsilon . p . f . \eta$$

Dónde:

$\varepsilon \equiv factor\ de\ fisión\ rápida$

$p \equiv probabilidad\ de\ escape\ a\ la\ captura\ por\ resonancia$

$f \equiv factor\ de\ utilización\ térmica$

$\eta \equiv factor\ de\ reproducción$

- Cada uno de los cuatro factores representa un proceso que añade o resta neutrones al número de ellos producidos por fisión en una generación.

CICLO DE VIDA DEL NEUTRÓN

FÓRMULA DE LOS CUATRO FACTORES

- **Factor de fisión rápida:** incremento de la población de neutrones rápido en una generación
  - ✓ **Fisión rápida**: primer proceso que los neutrones de una generación pueden sufrir.
    - Causada por los neutrones de fisión cuyas energías se encuentran en el rango de las energías rápidas. Para que un neutrón pueda ser absorbido por un núcleo de combustible como neutrón rápido, debe pasar lo suficientemente cerca de él mientras sigue siendo neutrón rápido.
    - Resultado de este proceso: incremento neto de la población de neutrones rápidos en el núcleo del reactor.
    - Sólo un pequeño número de neutrones rápidos causan este tipo de fisión (por ejemplo, la sección eficaz de fisión rápida del U-235 o U-238 es pequeña, por lo que sólo un pequeño número de neutrones rápidos causan este tipo de fisión).

$$\varepsilon = \frac{número\ de\ neutrones\ rápidos\ generados\ por\ todas\ las\ fisiones}{número\ de\ neutrones\ rápidos\ generados\ por\ fisiones\ térmicas}$$

  - ✓ El factor de fisión rápida depende de la disposición y las concentraciones del combustible y del moderador.
    - Reactor homogéneo (los átomos de combustible están rodeados de átomos de moderador)→ $\varepsilon \approx 1$
    - Reactor heterogéneo (todos los átomos de combustible están muy juntos) → $\varepsilon \approx 1.03$

CICLO DE VIDA DEL NEUTRÓN

FÓRMULA DE LOS CUATRO FACTORES

- **Probabilidad de escape a la captura por resonancia:** probabilidad de que un neutrón no sea absorbido por un pico de resonancia
  - ✓ En la deceleración de los neutrones rápidos, en la región de resonancia del U-238 (entre 6 y 200 eV apr.), existe la posibilidad de que algunos de esos neutrones sean capturados.

$$p = \frac{número\ de\ neutrones\ que\ alcanzan\ energías\ térmicas}{número\ de\ neutrones\ rápidos\ que\ disminuyen\ la\ velocidad}$$

  - ✓ Depende de manera importante de la disposición de combustible-moderador y del nivel de enriquecimiento del U-235 (si se usa). Siempre es ligeramente menor que 1 (0.95-0.99).
    - Reactor homogéneo → p ↓
    - Reactor heterogéneo → p ↑

CICLO DE VIDA DEL NEUTRÓN

FÓRMULA DE LOS CUATRO FACTORES

- **Factor de utilización térmica:** efectividad del combustible en la absorción de los neutrones térmicos.
  - ✓ Una vez termalizados, los neutrones siguen difundiéndose por todo el reactor, estando sujetos a la absorción por otros materiales del reactor, así como por el combustible.

$$f = \frac{número\ de\ neutrones\ absorbidos\ por\ el\ combustible}{número\ de\ neutrones\ térmicos\ absorbidos\ por\ todos\ los\ mateirales\ del\ reactor}$$

  - ✓ El valor de f siempre es inferior a 1.
  - ✓ f puede expresarse en función de las velocidades de reacción:

$$f = \frac{velocidad\ de\ absorción\ de\ neutrones\ térmicos\ por\ el\ combustible}{velocidad\ de\ absorción\ de\ neutrones\ térmicos\ por\ todos\ los\ materiales\ del\ reactor}$$

$$f = \frac{\sum_a^U . \phi^U . V^U}{\sum_a^U . \phi^U . V^U + \sum_a^m . \phi^m . V^m + \sum_a^v . \phi^v . V^v}$$

$\sum_a \equiv ratio\ de\ absorción$ $\quad U \equiv Uranio$

$\phi \equiv flujo$ $\quad m \equiv moderador$

$V \equiv volumen$ $\quad v \equiv veneno$

CICLO DE VIDA DEL NEUTRÓN

FÓRMULA DE LOS CUATRO FACTORES

- Reactor homogéneo (mismo flujo y volumen de U, m y V)→ $f = \frac{\sum_a^U}{\sum_a^U + \sum_a^m + \sum_a^v}$

✓ Puesto que los ratios de absorción varían con la temperatura, el factor también variaría con la temperatura, pero se observa que todos los términos cambian en la misma cantidad por lo que la relación sigue siendo la misma.

✓ En los **reactores heterogéneos moderados por agua**:

- Cuando la temperatura del agua sube, este se expande, saliendo una cantidad significativa del núcleo del reactor. Esto significa que el **número de átomos de moderador por cm³ se reducirá**, lo cual hará que sea **menos probable que un neutrón sea absorbido por un átomo moderador**.
- Consecuencia: incremento de la utilización térmica, ya que ahora los neutrones tienen más opciones de golpear a los átomos de combustible**. f es positivo**.

CICLO DE VIDA DEL NEUTRÓN

FÓRMULA DE LOS CUATRO FACTORES

- **Factor de reproducción:** relación del número de neutrones rápidos producidos por fisión térmica con respecto al número de neutrones térmicos absorbidos por el combustible.
  - ✓ La mayoría de los neutrones absorbidos por un núcleo de combustible causan su fisión, pero algunos no lo hacen.

$$\eta = \frac{número\ de\ neutrones\ rápidos\ producidos\ por\ fisión\ térmica}{número\ de\ neutrones\ térmicos\ absorbidos\ por\ el\ combustible}$$

  - ✓ Otra manera de definirlo:

$$\eta = \frac{velocidad\ de\ producción\ de\ neutrones\ rápidos\ por\ fisión\ térmica}{velocidad\ de\ absorción\ de\ neutrones\ térmicos\ por\ el\ combustible}$$

$$\eta = \frac{\sum_f^U . \phi^U . v^U}{\sum_a^U . \phi^U}$$

$\sum_f \equiv ratio\ de\ fisión$

$\phi \equiv flujo$

$v \equiv número\ promedio\ de\ neutrones\ producidos\ por\ fisión$

CICLO DE VIDA DEL NEUTRÓN

FÓRMULA DE LOS CUATRO FACTORES

- Para diferentes isótopos de uranio se tienen los siguientes valores:

TABLE 1
Average Number of Neutrons Liberated in Fission

Fissile Nucleus	Thermal Neutrons		Fast Neutrons	
	ν	η	ν	η
Uranium-233	2.49	2.29	2.58	2.40
Uranium-235	2.42	2.07	2.51	2.35
Plutonium-239	2.93	2.15	3.04	2.90

Fuente: Nuclear Physics and Reactor Theory, 1993 (Department of Energy United Stated of America).

- En el caso de que el combustible esté compuesto por varios materiales fisionables, es necesario tener en cuenta cada material. Por ejemplo, un reactor con U-235 y U-238

$$\eta = \frac{N^{U-235}.\sigma_f^{U-235}.\nu^{U-235}}{N^{U-235}.\sigma_a^{U-235} + N^{U-238}.\sigma_a^{U-238}}$$

CICLO DE VIDA DEL NEUTRÓN

FÓRMULA DE LOS CUATRO FACTORES

- Si la temperatura varía, las secciones eficaces macroscópicas, de absorción y de fisión varían de acuerdo con la relación $1/v$.
- Dado que tanto el numerador como el denominador cambian por igual, el cambio neto en η es cero.
- Por lo tanto, η cambia solo con el cambio de nivel de enriquecimiento del U-235.
  - ✓ η aumenta con el enriquecimiento del U-235 porque habrá menos U-238 en el reactor, por lo que serán más probable que un neutrón absorbido por el combustible lo sea por U-235 causando su fisión.
- El cálculo de η de un solo nucleído es más sencillo que para una mezcla de ellos:

$$\eta = \frac{\sigma_f . V}{\sigma_a}$$

CICLO DE VIDA DEL NEUTRÓN

RECURSOS

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