

Cálculos de Evolución o de Quemado del Combustible

Durante la operación de un reactor, la composición de los materiales cambia debido a que están expuestos al flujo de neutrones y debido al decaimiento radiactivo.

Estos cambios afectan a cantidades importantes como el factor de multiplicación de neutrones, las secciones eficaces y la distribución de potencia. Esto introduce una dependencia con el tiempo, del sistema, el cual se describe mediante una serie de cálculos de flujo o diferentes puntos en el tiempo.

Los principales isótopos que experimentan un proceso de evolución o de quemado son:

- **Los metales pesados.** Son isótopos quemables con peso atómico mayor a 225 uma. En general son capaces de fisionarse. La figura 1 muestra una cadena de isótopos pesados quemables.
- **Los productos de fisión.** Son isótopos quemables con peso atómico menor a 225 uma y son resultado del proceso de fisión. Son los productos de la fisión y sus hijas obtenidas del subsecuente decaimiento radiactivo y/o por reacciones con neutrones. La figura 2 muestra algunas cadenas de productos de fisión. En esta figura, una flecha horizontal indica una absorción neutrónica. La flecha vertical, con su correspondiente número indica un decaimiento beta y su vida media,. La flecha inclinada con su correspondiente número indica el rendimiento de fisión (fission yield) para el isótopo producido directamente de la fisión.
- **Isótopos quemables.** Son isótopos que se utilizan para compensar la reactividad del combustible fresco y presentan un alto poder de absorción que van perdiendo con el quemado, conforme van absorbiendo neutrones, la figura 3 muestra un ejemplo de cadenas de los isótopos quemables más conocidos o utilizados.

La ecuación diferencial general que describe la variación de la composición de los isótopos en el reactor es:

$$\frac{dN_A}{dt} = -\lambda_A N_A - \left[\sum_g \sigma_{ag}^A \phi_g \right] N_A + \lambda_B N_B + \left[\sum_g \sigma_{\gamma g}^C \phi_g \right] N_C$$

en donde:

$\lambda_A N_A$ son las pérdidas debidas al decaimiento radiactivo de A.

$\left[\sum_g \sigma_{ag}^A \phi_g \right] N_A$ son las pérdidas debido a la captura de neutrones por A.

$\lambda_B N_B$ son las ganancias debido al decaimiento de B en A.

$\left[\sum_g \sigma_{\gamma}^C \phi_g \right] N_C$ son las ganancias debido a la transmutación de C en A vía captura neutrónica.

Esta ecuación se escribe para todos los isótopos de interés dando lugar a sistemas de ecuaciones que son resueltos numéricamente. Para la solución se acostumbra utilizar la aproximación del flujo constante durante el paso de quemado, el cual puede ser “corregido” en un proceso iterativo, como se muestra en la figura 4.

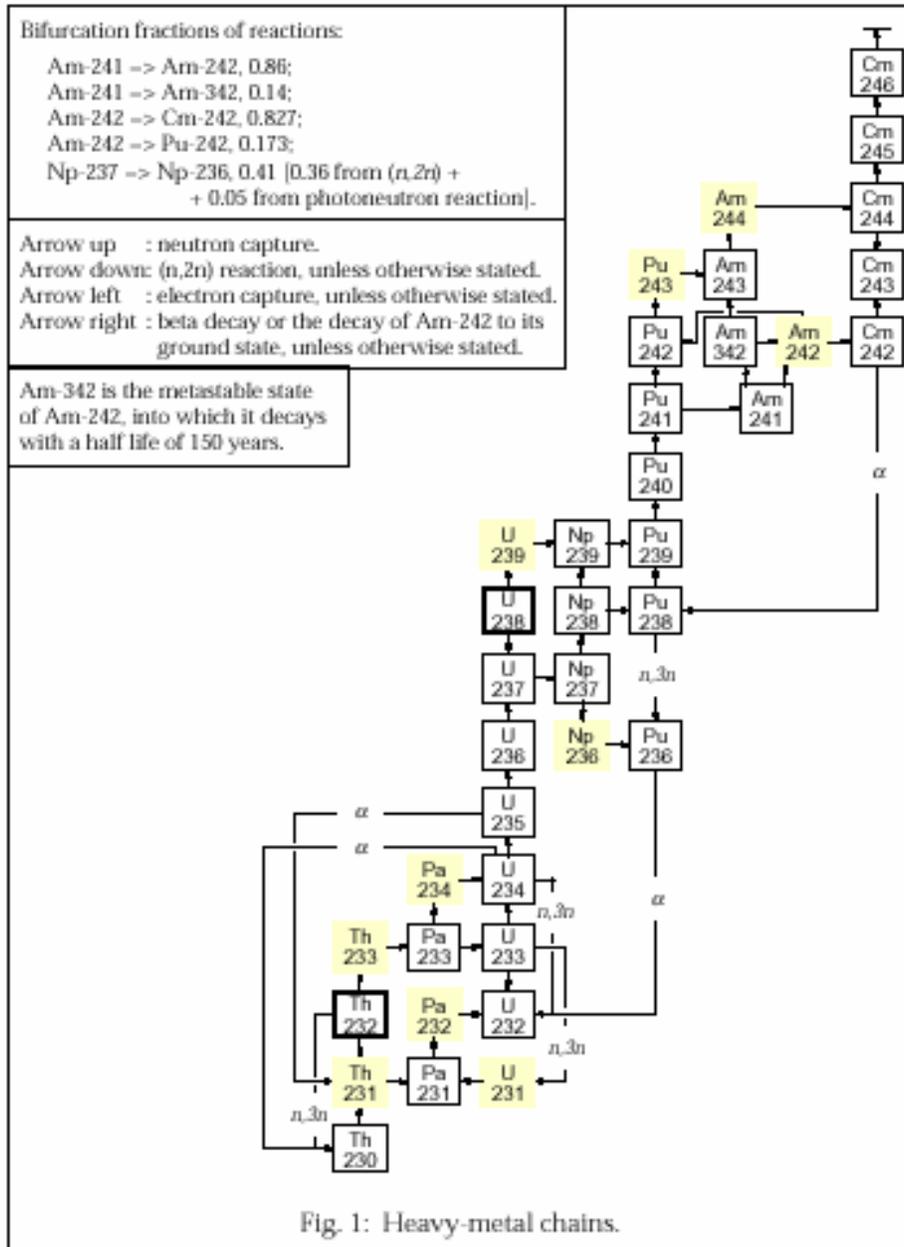


Fig. 1: Heavy-metal chains.

Figura 1. Cadena de isótopos pesados quemables [manual de HELIOS].

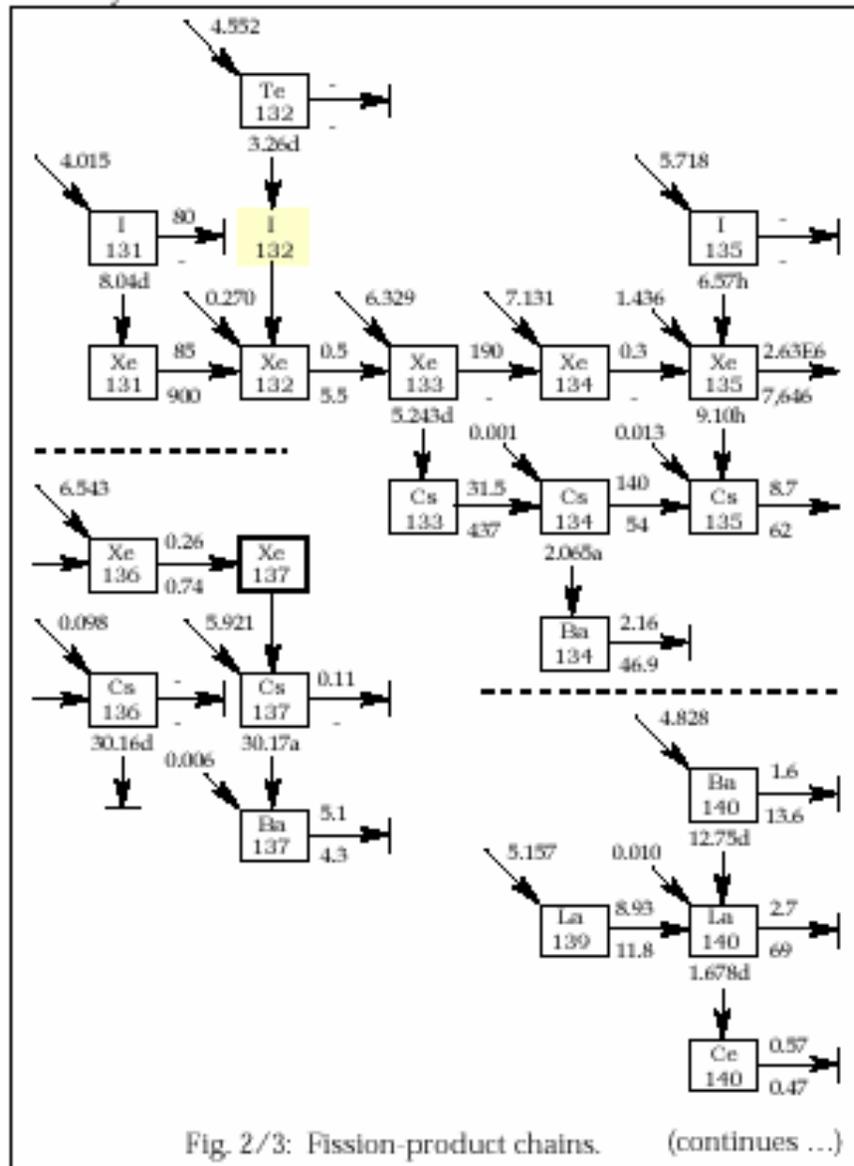


Figura 2. Cadena de productos de fisión [manual de HELIOS].

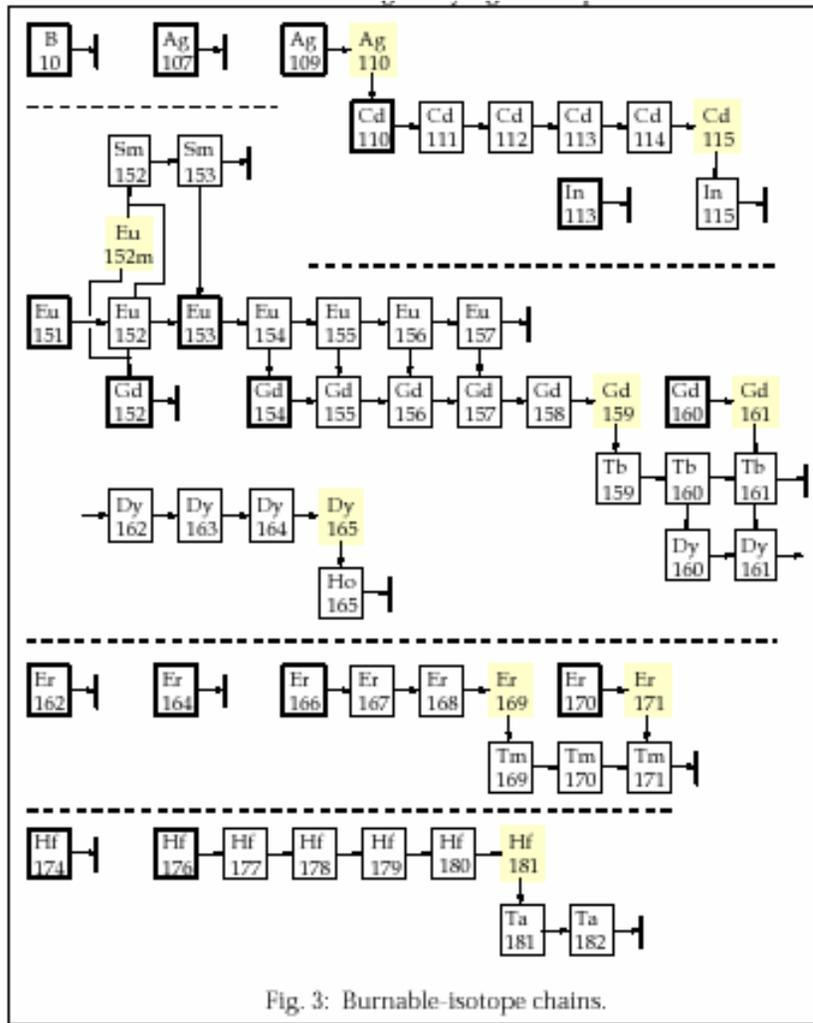


Fig. 3: Burnable-isotope chains.

Figura 3. Cadena de isótopos quemables [manual de HELIOS].

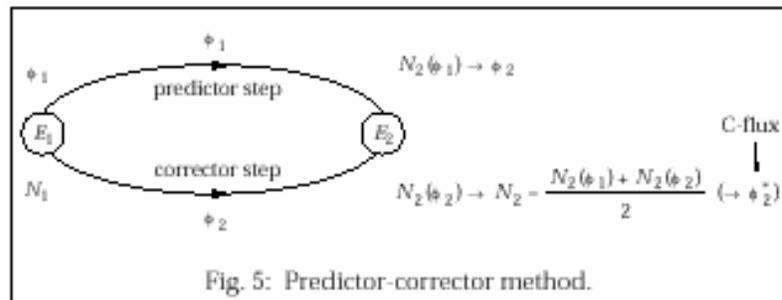


Fig. 5: Predictor-corrector method.

Figura 4. Método iterativo predictor-corrector [manual de HELIOS].

Decaimiento del combustible gastado

Una vez que el combustible fue utilizado en el reactor y es trasladado a la alberca de combustible gastado, sigue siendo radioactivo y transformándose de un isótopo a otro. El decaimiento del combustible gastado está relacionado con el decaimiento radioactivo de una cantidad de material inicial, en este caso la cantidad presente en el momento en el que el combustible se descarga del reactor. Un ejemplo de decaimiento es la cadena resultante de la desintegración radioactiva del Pb^{211} , el cual es en sí mismo un miembro del esquema del decaimiento radioactivo del U^{235} . Empezando con el Pb^{211} , la cadena de decaimiento es:

Nuclido:	$_{82}Pb^{211}$	$\xrightarrow{\beta^-}$	$_{83}Bi^{211}$	$\xrightarrow{\alpha}$	$_{81}Tl^{207}$	$\xrightarrow{\beta^-}$	$_{82}Pb^{207}$
Tiempo de vida media:	36.1 min		2.15 min		4.79 min		estable
Denotado por el subíndice:	1		2		3		4

Suponiendo que se tienen N_1^0 átomos de Pb^{211} en el tiempo cero y no hay fuentes de Pb^{211} presentes. La razón neta de cambio en el número de átomos de Pb^{211} es

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \dots \dots \dots (1)$$

La razón neta en el cambio del número de átomos de Bi^{211} es

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \dots \dots \dots (2)$$

y las ecuaciones correspondientes para el Tl^{207} y Pb^{207} son

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3 \dots \dots \dots (3)$$

y

$$\frac{dN_4}{dt} = -\lambda_3 N_3 \dots \dots \dots (4)$$

En el caso general de una cadena de decaimiento radioactivo



en la cual el material inicial está presente en cada radionuclido en un monto N_i^0 en el tiempo cero, y si no hay otras fuentes de material inicial, el monto N_i de algún nuclido presente en el tiempo t se puede obtener ya sea analíticamente o bien mediante el uso de algún método numérico.

La figura 5 muestra las cadenas de decaimiento de los principales radionuclidos presentes en el combustible gastado después de irradiar el UO_2 .

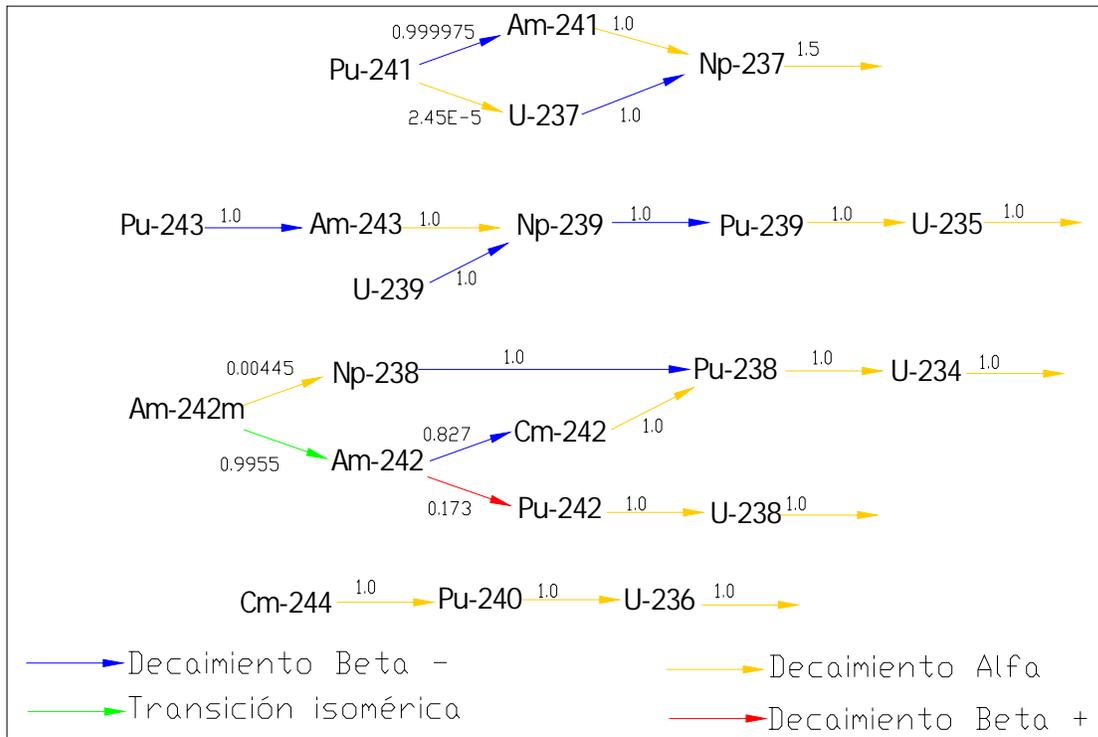


Figura 5. Cadenas de decaimiento