

Fundamentos de Ingeniería Nuclear: prácticas de simulación computacional vía Internet^{*}

Miguel Moro Vallina^{**}

1. Utilización del programa interactivo Agrsein (Análisis GRáfico de Secciones Eficaces por INternet) y resolución de los problemas asociados

Consideraciones generales La sección eficaz es la expresión *macroscópica* de un fenómeno de interacción nuclear. Intuitivamente, si un neutrón incide sobre un material (supongamos una pared de un cierto espesor), es lógico pensar que cuanto mayor sea su velocidad (*i.e.*, su energía cinética), mayor *probabilidad* existirá de que dicho neutrón atraviese el material sin ser atrapado por él.

Matemáticamente, esta idea se puede formalizar más definiendo el concepto de *recorrido libre medio* como la longitud que, en promedio, penetrará en el material un neutrón del haz incidente sin haber participado en ninguna reacción nuclear. Se demuestra que el recorrido libre medio es el inverso de la sección eficaz macroscópica total del material del que se trate: $\lambda_t = \frac{1}{\Sigma_t}$.

En general, la *función de excitación* de una reacción de captura radiactiva está dividida en tres zonas bien diferenciadas. La la región de bajas energías, σ_γ disminuye sistemáticamente al aumentar la energía neutrónica, en proporción inversa a la raíz cuadrada de la energía; a ésta se la denomina *región $\frac{1}{v}$* . A continuación, aparece la región de *resonancias aisladas o resueltas*, resonancias que se suceden con frecuencia creciente hasta que, en la zona posterior —llamado tramo de *resonancias no resueltas* o de *soplamiento de resonancias*—, éstas quedan indiscernibles.

¿Cómo se explica la existencia de resonancias en la función de excitación? Uno de los modelos más útiles y sencillos es el denominado *modelo de reacción a través del núcleo compuesto*, propuesto por NIELS BOHR en 1936. Según este

^{*}Esta memoria corresponde a las prácticas obligatorias de simulación computacional de la asignatura de Fundamentos de Ingeniería Nuclear, asignatura del Plan 2001 carrera de Ingeniería Industrial de la Universidad Nacional de Educación a Distancia. This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 2.5 Spain License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/es/> or send a letter to Creative Commons, 543 Howard Street, 5th Floor, San Francisco, California, 94105, USA. La composición de este documento se ha realizado mediante L^AT_EX.

^{**}Correo: narodnaia@gmail.com. Web: <http://narodnaia.googlepages.com>

modelo —que posee fuertes analogías con el del *complejo activado* en las reacciones químicas—, la reacción nuclear se produce con la intermediación de un *núcleo compuesto*, altamente energético e inestable:



Los núcleos poseen varios estados excitados, que corresponden a determinadas configuraciones de nucleones en el núcleo. El proyectil incidente y el núcleo blanco tendrán una probabilidad mucho mayor de combinarse —o, dicho en otros términos, la sección eficaz de la reacción será mucho mayor— si la energía del proyectil es tal que el núcleo compuesto se produce en uno de sus estados excitados.

35, p. 51

Problema 1 Las secciones eficaces en los picos de resonancia son, a veces, grandes. Indique, para el ^{113}Cd y el ^{135}Xe , en torno a qué energías se producen los picos mayores (máximos absolutos) y el valor de la sección eficaz en los mismos.

Resolución Los datos suministrados al programa Agrsein para la resolución de este problema pueden verse en la figura (1). La gráfica producida por el programa es la de la figura (2). En dicha gráfica se observan las regiones $\frac{1}{v}$. En ambos nucleidos se observa un máximo absoluto en torno a una energía de 1 eV del neutrón incidente. Se puede observar que para dicha energía el ^{135}Xe posee una sección eficaz de aproximadamente 10^7 barnios, mientras que la del ^{113}Cd se halla dos órdenes de magnitud por debajo, correspondiendo a un valor de 10^5 .

El ^{135}Xe carece de resonancias, mientras que el ^{113}Cd presenta una zona de *resonancias resueltas* en el rango entre 10 eV y 1 keV. A partir de dicha magnitud, el ^{113}Cd muestra la zona de *soplamiento de resonancias*.

Es de señalar la alta sección eficaz del ^{135}Xe , sobremanera en el rango energético de los *neutrones térmicos*. Este isótopo artificial, que se obtiene por irradiación neutrónica en reactores nucleares, actúa por tanto como un potente *veneno neutrónico*. La ausencia de resonancias en el ^{135}Xe indica que carece de configuraciones nucleónicas correspondientes a un compuesto excitado.

42 y 43, p. 54

Problema 2 Es una práctica común en ingeniería nuclear de reactores de fisión utilizar el término *fisionable* para designar a aquellos nucleidos que poseen una sección eficaz de fisión significativa (≥ 1 barn) con neutrones de energía menor de 18 MeV. Compruebe gráficamente cuál de los siguientes nucleidos es fisionable: ^{95}Mo , ^{98}Mo , ^{139}La , ^{233}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{239}Pu . Dentro de la categoría de nucleidos fisionables, cabe distinguir dos clases de especies nucleares distintas, según se pueden (nucleidos fisibles) o no se puedan (nucleidos no fisibles) fisionar con neutrones de cualquier energía. Indique cuáles de los nucleidos analizados en la pregunta anterior son fisibles.¹

¹Realizamos ambos problemas juntos, debido a sus similitudes y al interés de combinarlos.

http://www.iener.uned.es - Generación de gráficas - Mozilla Firefox

Generación de gráficas de XS

Librería: ENDF

Gráfica simple ☐ Comparaciones ☐

☐ XS ☒ Material ☐ Temperaturas

Datos de entrada:

XS : 102 Temps (K): 300

MAT : 4846 5458

Mínimo Máximo

Fijar escala ☒ 1e-5 1e7 Energía (eV)

1e-4 1e8 Sección eficaz (barn)

Done

Figura 1: Captura de pantalla del manejo de Agrsein para el problema 1.

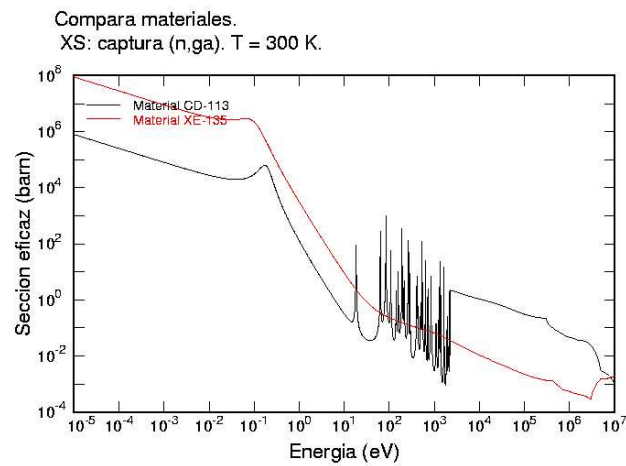


Figura 2: Gráfica de σ_γ para el ^{113}Cd y el ^{135}Xe (problema 1).

Conceptos Se dice que un nucleido es fisionable cuando, al bombardearlo con neutrones de energía inferior a 18 MeV, puede fisionarse de manera significativa. De modo equivalente, puede decirse que un nucleido es fisionable si, mediante el bombardeo con neutrones de energía inferior a la citada, su sección eficaz de fisión supera un cierto umbral que se establece en 1 barn.

Existe un subconjunto de los nucleidos fisionables que pueden fisionarse con neutrones de cualquier energía. A estos se los denomina nucleidos *fisibles*. En general, se puede decir que si el núcleo blanco tiene los números A y Z de distinta paridad, será fisible, mientras que si A y Z tienen la misma paridad, el núcleo será fisionable pero no fisible.

En general, para un determinado nucleido, se da una suerte de *competencia* entre las diferentes reacciones nucleares que pueden acontecer con él. Con los nucleidos fisibles a bajas energías neutrónicas sólo son posibles *tres* tipos de reacciones: *dispersión elástica*, *captura radiactiva* y *fisión*. No obstante, el valor de σ_d es notablemente inferior a los valores de σ_γ y de σ_f ; en consecuencia, a efectos prácticos, las reacciones que realmente compiten son la fisión y la captura radiactiva.

Se dice que nos hallamos ante una *captura fértil* cuando, a partir de un material con una escasa capacidad para fisionarse, se puede obtener un material con propiedades mucho mejores. La reacción $^{238}\text{U} + n \longrightarrow ^{239}\text{Pu}$ y la $^{232}\text{Th} + n \longrightarrow ^{233}\text{U}$ son ejemplos de capturas fértiles.

Resolución En la gráfica (3) aparecen los datos proporcionados al programa Agrsein para la elaboración de una de las gráficas. En todas las demás se obra de modo idéntico, cambiando solamente el material en cuestión. Es notorio que, para los tres primeros nucleidos que aparecen en el enunciado del problema (^{95}Mo , ^{98}Mo y ^{139}La), ninguna de las dos librerías de datos nucleares que maneja el Agrsein ofrecen datos para la reacción de fisión. Para los demás nucleidos, se obtienen las gráficas (4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10). El carácter fisionable y/o fisible de cada uno de los nucleidos se muestra en la tabla (1), en la que también se indican algunas cuestiones que nos han llamado la atención en algunos de los nucleidos.

Para completar el análisis de este problema, hemos realizado una gráfica en la que se muestran, para el isótopo ^{238}U , las secciones eficaces de fisión y de captura radiactiva. Los datos que se le han pasado al Agrsein pueden observarse en la figura (11); la gráfica proporcionada por el programa es la (12). Se observa claramente la enorme diferencia entre los valores de las secciones eficaces de captura radiactiva (σ_γ) y de fisión (σ_f). La gran aptitud para capturar neutrones del ^{238}U , por decirlo así, «hace competencia» a su aptitud para fisionarse, determinando así una baja σ_f .

Problema 3 Comente las diferencias y similitudes que encuentre entre la región/estructura de resonancias resueltas de los elementos: cadmio, rodio, plata, oro y ^{238}U .

http://www.iener.uned.es - Generación de graficas - Mozilla Firefox

Generación de gráficas de XS

Librería:

Gráfica simple ☐ Comparaciones ☐

☐ XS ☒ Material ☐ Temperaturas

Datos de entrada:

XS : Temps (K):

MAT :

Fijar escala ☒

	Mínimo	Máximo	
1e-5	1e7	Energía (eV)	
1e-4	1e8	Sección eficaz (barn)	

Done

Figura 3: Captura de pantalla del manejo de Agrsein para el problema 2.

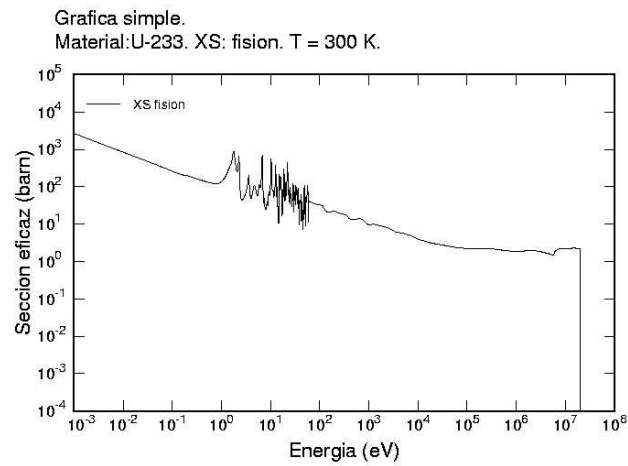


Figura 4: Gráfica de σ_f para el ^{233}U (problema 2).

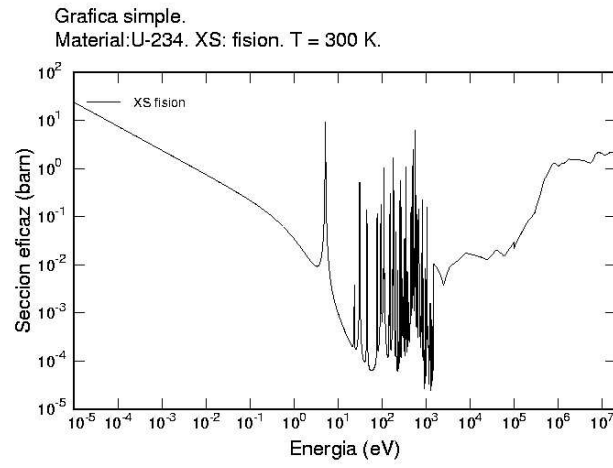


Figura 5: Gráfica de σ_f para el ^{234}U (problema 2).

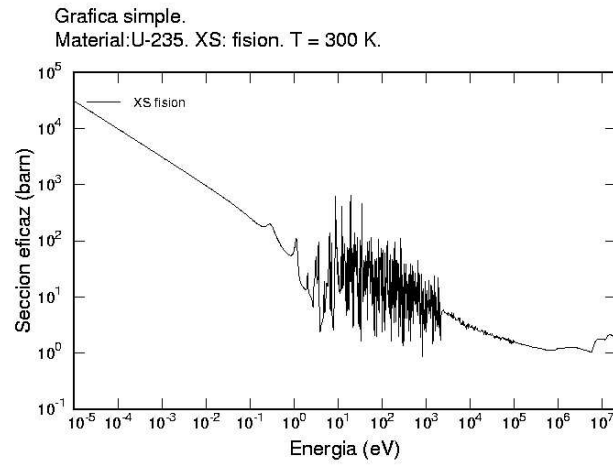


Figura 6: Gráfica de σ_f para el ^{235}U (problema 2).

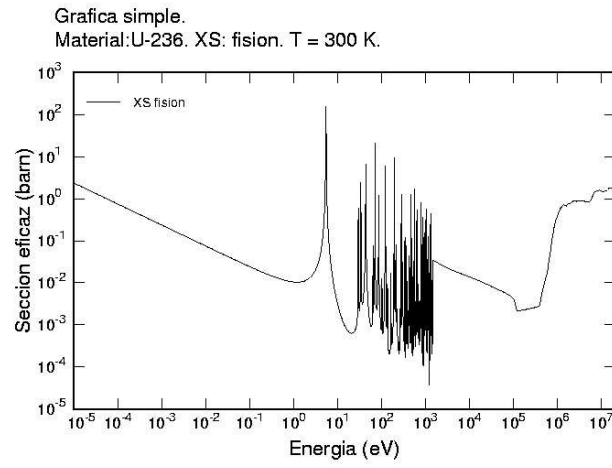


Figura 7: Gráfica de σ_f para el ^{236}U (problema 2).

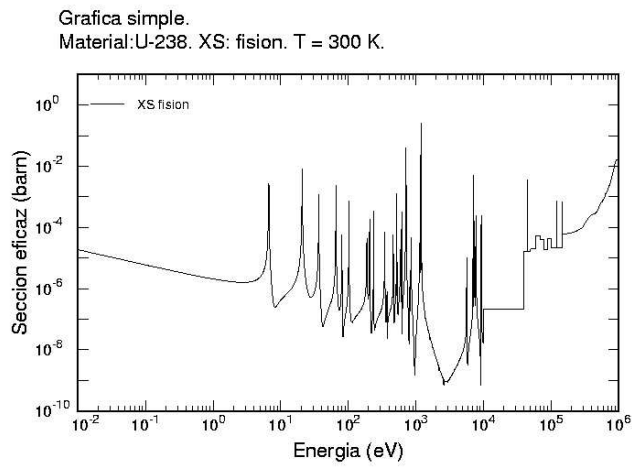


Figura 8: Gráfica de σ_f para el ^{238}U (problema 2).

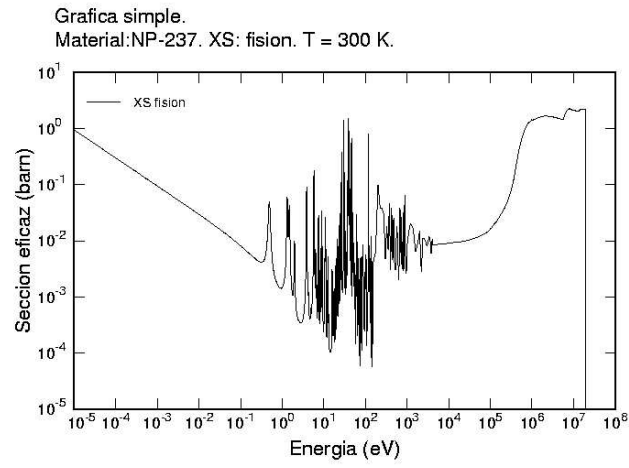


Figura 9: Gráfica de σ_f para el ^{237}Np (problema 2).

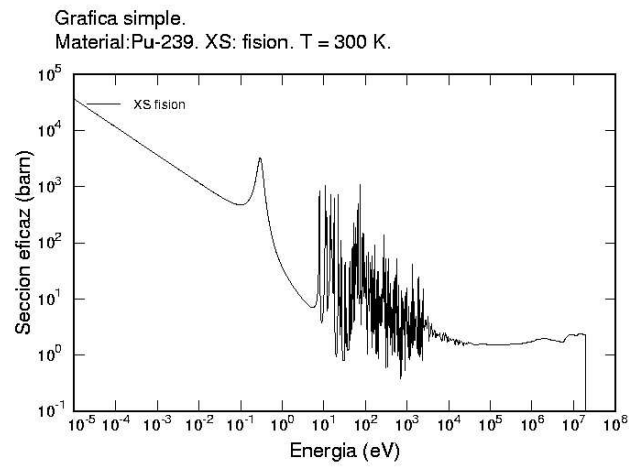


Figura 10: Gráfica de σ_f para el ^{239}Pu (problema 2).

Cuadro 1: Problema 2. Isótopos fisionables y fisibles

Isótopo	Fisionable	Fisible
^{233}U	Sí	Sí ^a
^{234}U	Sí ^b	No
^{235}U	Sí	Sí
^{236}U	Sí	No ^c
^{238}U	Sí ^d	No
^{237}Np	Sí	No ^e
^{239}Pu	Sí	Sí ^f

^aA partir de 0,1 MeV, la sección eficaz está sólo ligeramente por encima de 1 barn; su carácter fisible, por tanto, *no* es muy acusado

^bSe observan algunas resonancias aisladas entre los 5 eV y los 2 keV, aproximadamente, en las que el valor de la sección eficaz sube por encima de 1 barn; pero, en general, por debajo de 18 MeV, la sección eficaz se mantiene muy por debajo de ese valor, en torno a los 0,01–0,1 barn.

^cExisten resonancias aisladas en las que la σ_f asciende hasta valores situados entre la unidad y la centena de barn. Sin embargo, en la mayor parte del rango energético, la sección eficaz se mueve en valores por debajo de 1 barn, en torno a 0,1.

^dAunque es sabido que el ^{238}U es un isótopo fisionable, la gráfica obtenida indica, en realidad, que σ_f no alcanza —ni siquiera en la zona de resonancias aisladas— valores de 1 barn, y se mantiene, en la mayor parte del rango energético, en valores situados por debajo de 10^{-4} barn. Ya se ha mencionado que el ^{238}U posee una alta sección eficaz de captura radiactiva, aspecto que volverá a tratarse en el problema siguiente. La *competencia entre reacciones nucleares* permite comprender el vínculo existente entre la alta σ_γ y la baja σ_f .

^eSalvo en algunos picos de resonancia aislados y en el rango 1–10 MeV, σ_f se mantiene bastante por debajo de 1 barn, en una media de 0,01 barn, aproximadamente.

^fComo puede observarse, el ^{239}Pu posee una sección eficaz de fisión muy significativa, similar a la del ^{235}U . El hecho de que no se use en los reactores nucleares como isótopo fisible —al menos, en la mayor parte de los países— se debe a su posible desviación para usos militares.

http://www-ener.uned.es - Generación de graficas - Mozilla Firefox

Generación de gráficas de XS

Librería:

Gráfica simple Comparaciones

☐ Gráfica simple ☒ XS ☐ Material ☐ Temperaturas

Datos de entrada:

MAT : Temps (K):

XS :

Mínimo Máximo

Fijar escala ☒

Energía (eV)

Sección eficaz (barn)

Done

Figura 11: Captura de pantalla del manejo de Agrsein para el problema 2.

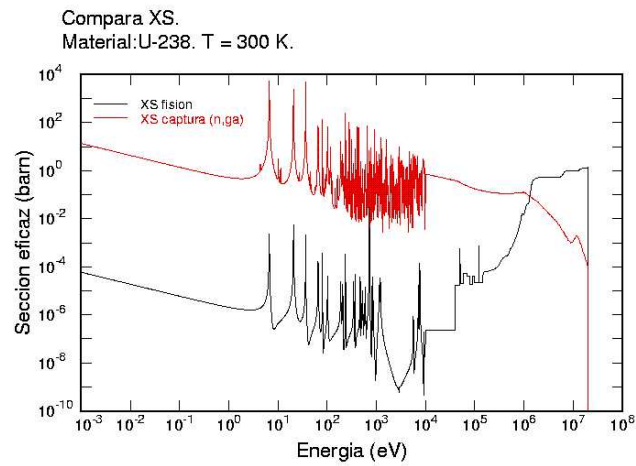


Figura 12: Gráfica de σ_f y σ_γ para el ^{238}U (problema 2).

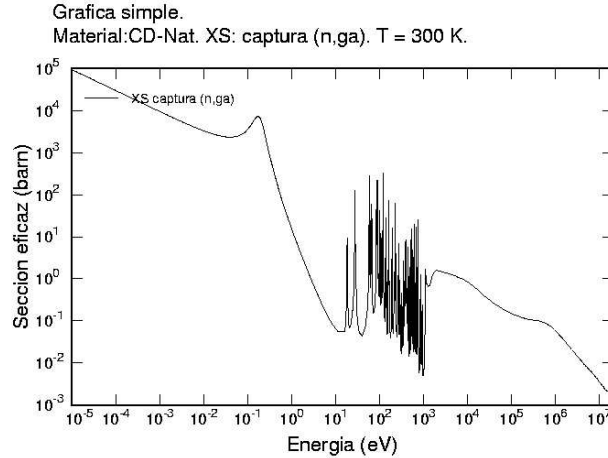


Figura 13: Gráfica de σ_γ para el cadmio natural (problema 3).

Resolución Se han elaborado cinco gráficas (13, 14, 15, 16 y 17), una para cada elemento.² Los datos introducidos en el Agrsein para la elaboración de una de las gráficas se muestran en la figura (18).

El ^{238}U es el nucleido que posee una zona de resonancias más amplia —entre 10 eV y 10 keV— y con niveles de sección eficaz más elevados —picos de resonancia entre 10 y 10^4 barn—. Ello es muestra, como ya se ha comentado repetidamente, de su enorme aptitud para la reacción (n, γ) . Los demás nucleidos poseen unas zonas de resonancias resueltas algo menos amplias —unos dos órdenes de magnitud, situados *grosso modo* entre los 10 y los 10^3 eV— y los valores de su sección eficaz son considerablemente menores —picos de resonancia situados entre los 10 y los 10^3 barn.

Es de destacar, en cualquier caso, que los nucleidos ^{107}Ag , ^{197}Au , ^{103}Rh y Cd natural poseen un primer pico de resonancia, considerablemente separado del resto —especialmente en el caso del cadmio—, que aparece para un nivel de energía situado entre las décimas y las unidades de eV, y que alcanza valores muy elevados, de unos 10^4 barn.

Problema 4 Grafique la sección eficaz de la reacción de captura radiactiva para el ^{238}U en el rango de 1 a 10^4 eV. Señale alguna característica que le llame la atención de la misma. Indíquese el valor máximo que alcanza la sección eficaz y para qué energía tiene lugar.

2, prop.

²En el caso de la *plata*, que posee dos isótopos estables (^{107}Ag y ^{109}Ag), se toma el ^{107}Ag por ser ligeramente más abundante. En el caso del *rodio*, se toma el ^{103}Rh , que es el único isótopo presente en el rodio natural. En el caso del *oro*, se toma el ^{197}Au por ser el único isótopo estable.

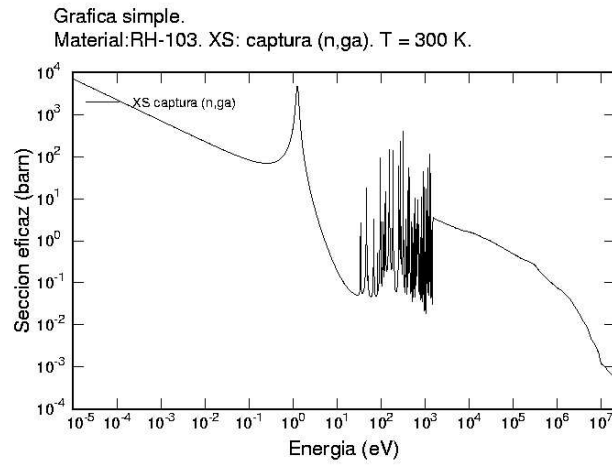


Figura 14: Gráfica de σ_γ para ^{103}Rh (problema 3).

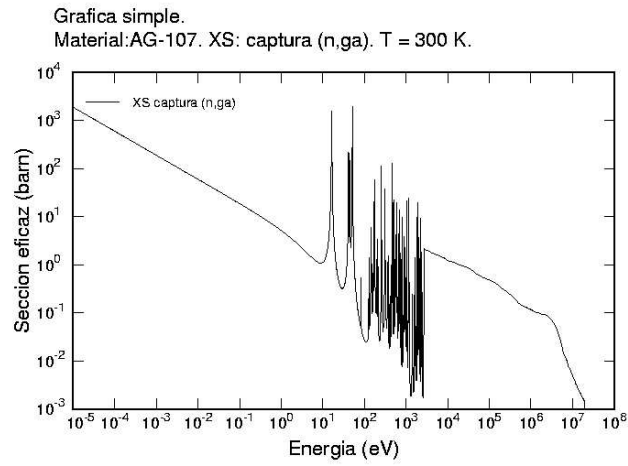


Figura 15: Gráfica de σ_γ para ^{107}Ag (problema 3).

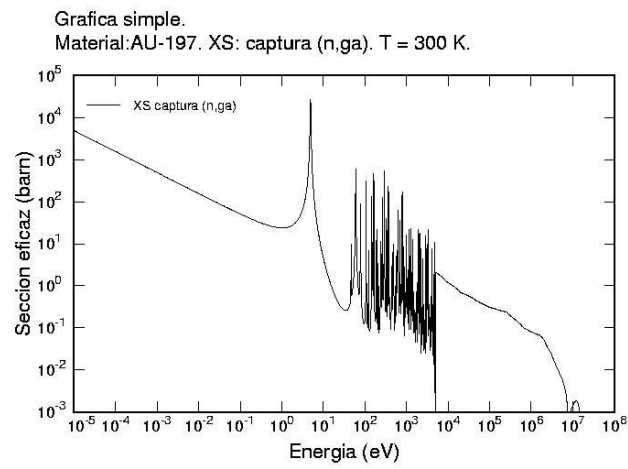


Figura 16: Gráfica de σ_γ para ^{197}Au (problema 3).

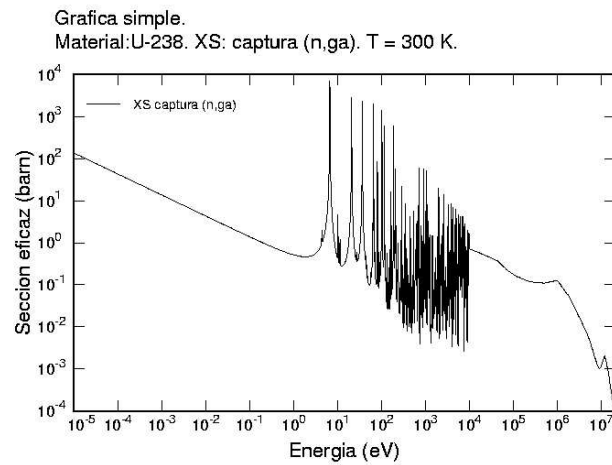


Figura 17: Gráfica de σ_γ para ^{238}U (problema 3).

Figura 18: Captura de pantalla del manejo de Agrsein para el problema 3.

Resolución Los datos introducidos en el Agrsein se muestran en la figura (19); la gráfica obtenida es la figura (20). Existen varias características destacables de dicha gráfica:

- En primer lugar, la profusión de resonancias: en realidad, el rango energético de esta gráfica corresponde precisamente a la zona de resonancias resueltas para el ^{238}U . Las resonancias, por otro lado, se van haciendo cada vez más frecuentes a medida que se avanza hacia la derecha en la escala logarítmica que representa la energía del neutrón incidente.
- La presencia, en las alas de las resonancias, de pequeñas «sub-resonancias» o «mini-resonancias», correspondientes a valores de la sección eficaz tres o cuatro órdenes de magnitud por debajo del valor de la sección eficaz de la resonancia en cuyos flancos se encuentran. Al igual que las resonancias principales, estas resonancias secundarias van quedando indiscernibles a medida que avanzamos en la escala energética.

La sección eficaz, por otra parte, alcanza su valor máximo en los tres primeros picos de resonancia —correspondientes, respectivamente, a energías de 6, 21 y 38 eV, respectivamente—, especialmente en los dos primeros, en los que ronda los 10^4 barnios.

50, p. 56

Problema 5 Clasifique el siguiente conjunto de nucleidos de acuerdo con los conceptos de nucleido fisionable y fisible según el comportamiento de su sección eficaz de fisión: ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th , ^{234}U , ^{236}U , ^{237}Np , ^{240}Pu y ^{241}Am .

http://www-ener.uned.es - Generación de graficas - Mozilla Firefox

Generación de gráficas de XS

Librería:

Gráfica simple
 ☐
 Comparaciones
 ☐

☐ XS
 ☐ Material
 ☐ Temperaturas

Datos de entrada:

MAT :
 Temps (K):

XS :

	Mínimo	Máximo	
Fijar escala ☒	1	1e4	Energía (eV)
	1e-4	1e4	Sección eficaz (barn)

Done

Figura 19: Captura de pantalla del manejo de Agrsein para el problema 4.

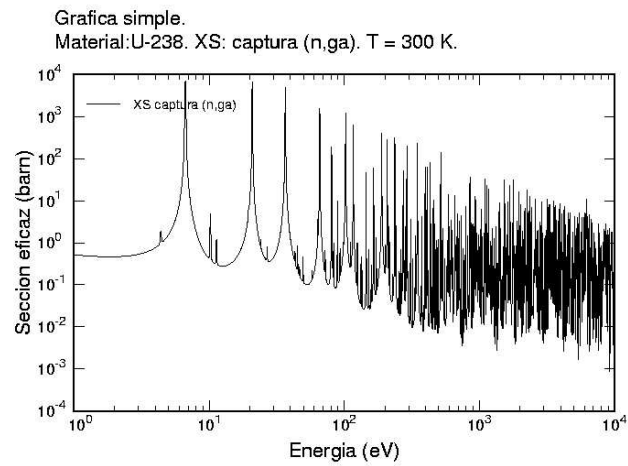


Figura 20: Gráfica de ^{238}U (problema 4)

http://www.dener.uned.es - Generación de gráficas - Mozilla Firefox

Generación de gráficas de XS

Librería:

Gráfica simple Comparaciones

☐ Gráfica simple ☐ XS ☒ Material ☐ Temperaturas

Datos de entrada:

XS : Temps (K):

MAT :

	Mínimo	Máximo	
Fijar escala ☒	1e-3	1e8	Energía (eV)
	1e-10	1e4	Sección eficaz (barn)

Done

Figura 21: Captura de pantalla del manejo de Agrsein para el problema 5.

Resolución Agruparemos los nucleidos mencionados en tres gráficas comparativas de su sección eficaz de fisión, σ_f . Los datos introducidos en el Agrsein se muestran en la figura (21) y las gráficas obtenidas en las figuras (22, 23 y 24). En ambas se emplean las mismas escalas logarítmicas para apreciar las diferencias entre las secciones eficaces.

Realizamos una clasificación de los distintos nucleidos en función de los valores de su sección eficaz, mostrando también su carácter fisionable y/o fisible. En la tabla (1) se muestra esta clasificación, en orden decreciente de aptitud para fisionarse.

Se pueden hacer, a la luz de la gráfica y la tabla, algunas *consideraciones*:

- En la gráfica se puede comprobar la superioridad del ^{235}U frente al resto de nucleidos como material fisible.
- En el rango energético del MeV, todos los nucleidos, excepto el ^{235}U , manifiestan la existencia de un cierto *umbral práctico*; a partir de esta energía, todos ellos presentan secciones eficaces de unos pocos barnios, a excepción del ^{232}Th , cuya sección eficaz no alcanza el valor de 1 barn.
- El carácter fisionable —aunque no fisible— de nucleidos como el ^{237}Np y el ^{241}Am —dos de los residuos radiactivos más problemáticos, tanto por su nivel de radiactividad como por su prolongadísimo tiempo de semidesintegración— abre la posibilidad, en curso de investigación en la actualidad, de fisionarlos para obtener nucleidos más «gestionables». La opción más adecuada en este sentido parece, en principio, la de emplear

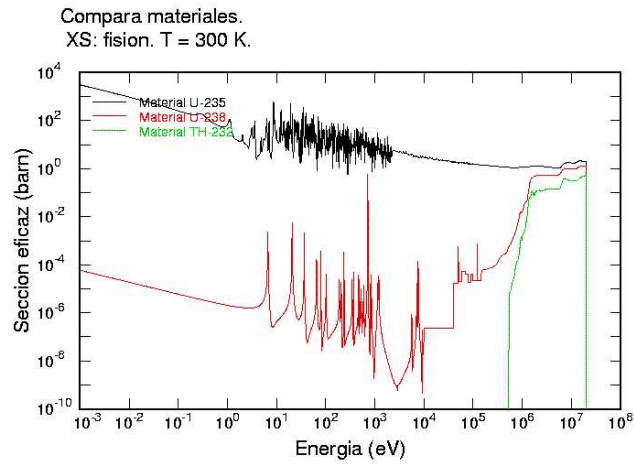


Figura 22: Gráfica de σ_f de ^{235}U , ^{238}U y ^{232}Th (problema 5).

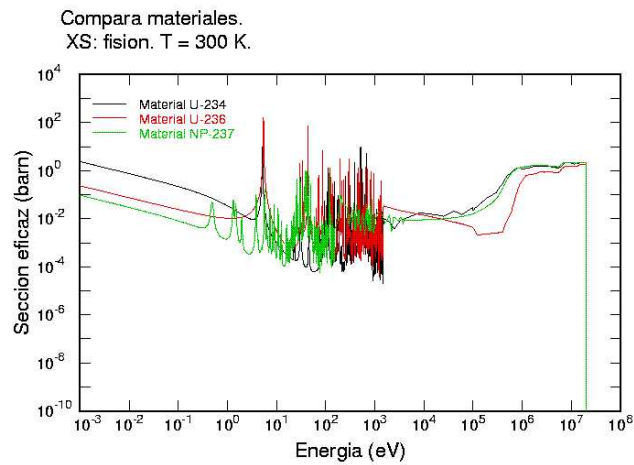


Figura 23: Gráfica de σ_f de ^{234}U , ^{236}U y ^{237}Np (problema 5).

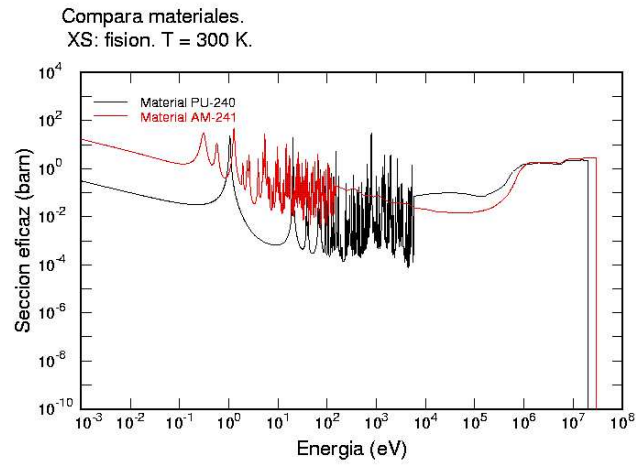


Figura 24: Gráfica de σ_f de ^{240}Pu y ^{241}Am (problema 5).

Cuadro 2: Problema 5: Isótopos fisionables y fisibles

Isótopo	Fisionable	Fisible
^{235}U	Sí	Sí
^{234}U	Sí	No
^{236}U	Sí	No
^{237}Np	Sí	No
^{241}Am	Sí	No
^{240}Pu	Sí	No
^{238}U	Sí	No
^{232}Th	Sí ^a	No

^aA pesar de que el ^{232}Th es conocido como un nucleido fisionable, es notorio que en la gráfica su sección eficaz no alcanza el valor de 1 barn para ninguna energía del neutrón incidente.

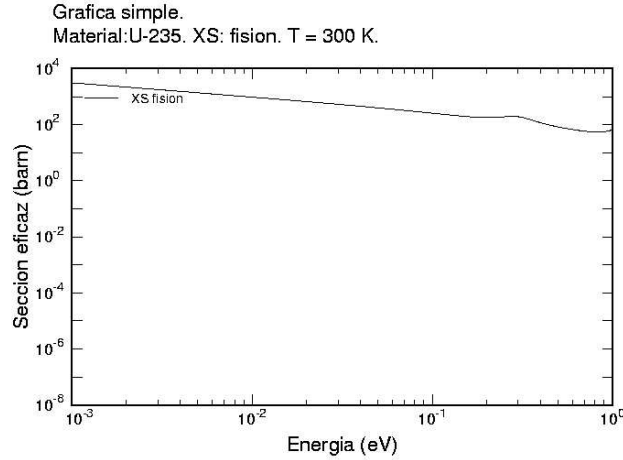


Figura 25: Gráfica de σ_f del isótopo ^{235}U (problema 6).

reactores asistidos por generador, que proporcionen los neutrones con la energía requerida para la fisión de dichos nucleidos.

Problema 6 Compare el valor de la sección eficaz para una energía del neutrón de aproximadamente 0,025 eV para las siguientes reacciones: reacción de fisión del ^{235}U y reacciones de captura radiactiva de hidrógeno, zirconio, hierro y ^{238}U . En función de estos valores, indicar alguna razón que justifique el uso del zirconio y no del acero en las vainas del combustible nuclear de un reactor de fisión basado en el uso de neutrones térmicos.

3, prop.

Resolución En las figuras (25 y 26) se muestran las gráficas de las secciones eficaces pedidas: la σ_f para el ^{235}U y la σ_γ para ^{238}U , hidrógeno, hierro y zirconio.³ En la figura (27) aparecen los datos introducidos en el Agrsein para la realización de esta segunda gráfica.

La sección eficaz de fisión correspondiente a una energía de 0,025 eV para el ^{235}U es de aproximadamente $2 \cdot 10^3$ barn. Las secciones eficaces aproximadas de captura radiactiva para los nucleidos ^1H , zirconio natural, ^{238}U y ^{56}Fe son, ordenadas de mayor a menor, las siguientes: 10^3 barn para el ^{238}U , 10 barn para el ^{56}Fe , 1,5 barn para el ^1H y 0,9 barn para el zirconio natural.

La razón de emplear zirconio y no acero en las vainas del combustible nuclear reside fundamentalmente en la economía neutrónica del reactor. Al ser la sección

³Para cada uno de estos elementos, se han seleccionado sus isótopos más abundantes: ^1H , ^{56}Fe y zirconio natural.

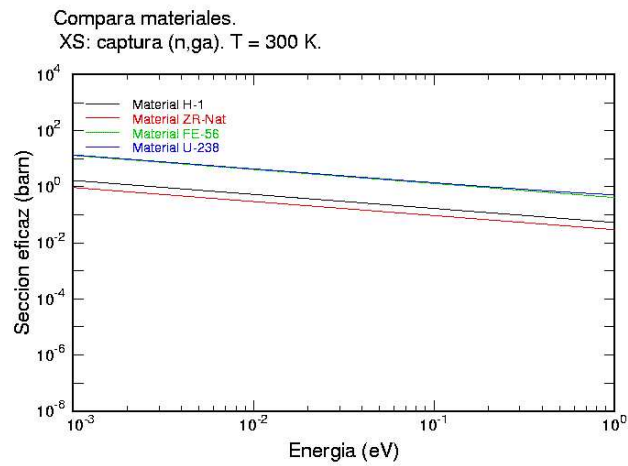


Figura 26: Gráfica de σ_γ de ^{238}U , ^1H , ^{56}Fe y Zr natural (problema 6).

http://www-ener.uned.es - Generación de graficas - Mozilla Firefox

Generación de gráficas de XS

Librería:

Gráfica simple ☐ Comparaciones ☐

☐ XS ☒ Material ☐ Temperaturas

Datos de entrada:

XS : Temps (K):

MAT :

	Mínimo	Máximo	
Fijar escala ☒	1e-3	1	Energía (eV)
	1e-8	1e4	Sección eficaz (barn)

Done

Figura 27: Captura de pantalla del manejo de Agrsein para el problema 6.

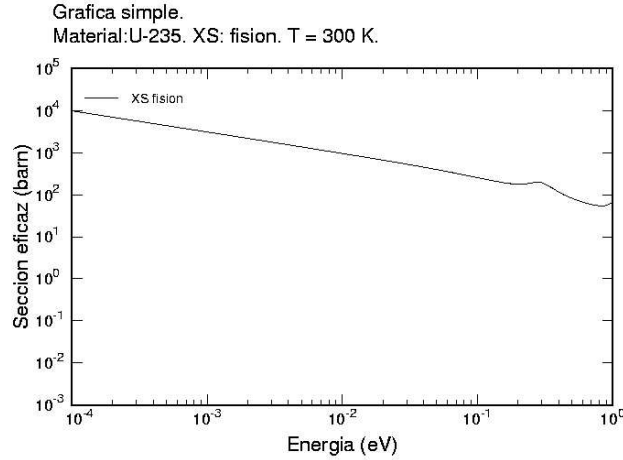


Figura 28: Gráfica de la σ_f del ^{235}U entre 10^{-4} y 1 eV (problema 7).

eficaz de captura neutrónica del hierro aproximadamente un orden de magnitud mayor que la del zirconio, es lógico pensar que el empleo de acero provocaría un descenso en la población neutrónica del reactor como consecuencia de las reacciones (n, γ) .

Problema 7 Grafique la sección eficaz de fisión del ^{235}U en los siguientes rangos energéticos: (i) de 10^{-4} a 1 eV; (ii) de 1 a 10^4 eV, y (iii) de 0,1 a 10 MeV. Compare el comportamiento de la sección eficaz en cada uno de los rangos, y señale alguna de las características que más le llama la atención de la sección eficaz en cada rango.

prop., 4

Resolución Las gráficas obtenidas para cada uno de los rangos energéticos pedidos aparecen en las figuras (28, 29 y 30).

La separación en los diferentes rangos energéticos efectuada en este problema coincide, *grosso modo*, con las tres regiones que se suelen diferenciar en la función de excitación de toda reacción nuclear:

- Existe una primera zona, con valores muy altos de la sección eficaz —entre 10^2 y 10^4 barnios— en la que la sección eficaz experimenta una tendencia *descendente* a medida que aumenta la energía cinética del neutrón incidente. En el caso del ^{235}U , este descenso es bastante monótono, con excepción de un pequeño pico que se presenta para una energía de aproximadamente 0,3 eV.
- La segunda zona coincide aproximadamente con la zona de resonancias

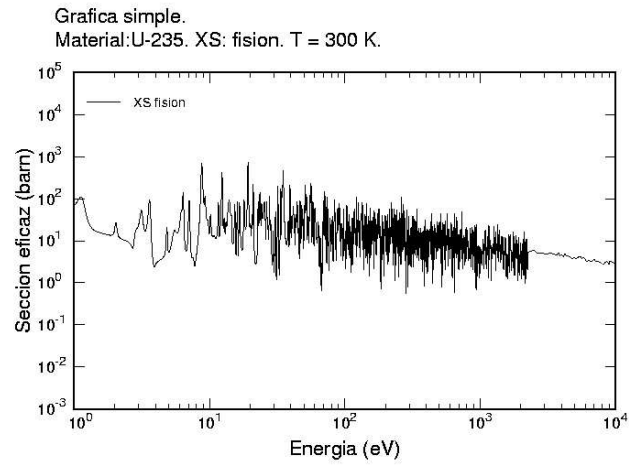


Figura 29: Gráfica de la σ_f del ^{235}U entre 1 y 10^4 eV (problema 7).

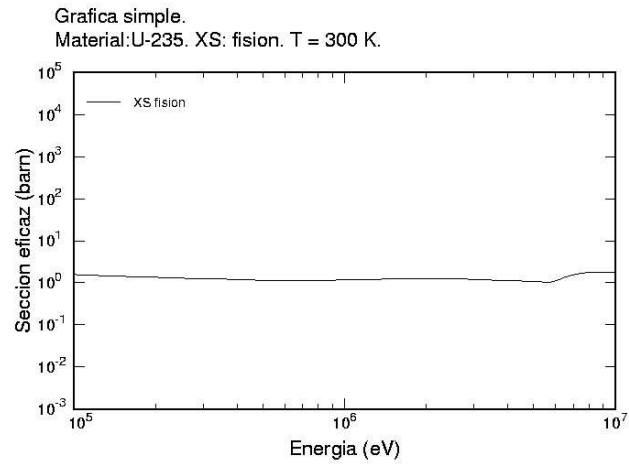


Figura 30: Gráfica de la σ_f del ^{235}U entre 0,1 y 10 MeV (problema 7).

resueltas. Aquí observamos unos valores medios de la sección eficaz que van siendo sustancialmente menores que en la región anterior —entre 1 y $2 \cdot 10^2$ barnios, superados ocasionalmente por algunos de los primeros picos de resonancia—. Las resonancias se van haciendo más numerosas y próximas a medida que aumenta la energía del neutrón incidente, y sus picos experimentan una cierta tendencia a la baja.

- Finalmente, en la zona de solapamiento de resonancias, éstas ya no se distinguen en la gráfica debido a lo próximos que están sus valores. En el caso del ^{235}U , se observa una gran constancia de la sección eficaz para todo el rango energético, que se mantiene, además, tan sólo ligeramente por encima de un barnio, aunque nunca desciende por debajo de dicho valor. A partir de los 5,5 MeV, aproximadamente, la sección eficaz aumenta ligeramente.

2. Utilización del programa Phrad (estudio de cadenas radiactivas tipo Padre e Hijo RADiactivos) y resolución de los problemas asociados

Consideraciones generales Existe una sola ley que rige todos los procesos de desintegración radiactiva, sean del tipo que sean. Dicha ley establece que la *probabilidad* de que un núcleo dado se desintegre en la unidad de tiempo es una constante independiente del instante de vida considerado, *i.e.*, de la *edad* del núcleo. Esta constante se denomina *constante de desintegración*, y se representa como λ . Otra magnitud muy útil para caracterizar la velocidad de desintegración de un determinado radionucleido es el *período de semidesintegración* $T_{\frac{1}{2}}$, que se define como el tiempo que ha de transcurrir para que el número de átomos radiactivos se reduzca a la mitad. Por su parte, la *vida media* (τ) se define como el valor medio de la vida de un átomo radiactivo.

Lógicamente, la naturaleza probabilística de los fenómenos atómicos no permite asegurar que *un* núcleo dado se desintegrará en un tiempo igual a su vida media. No obstante, la *ley de los grandes números* predice que, para un número suficientemente elevado de átomos radiactivos, la vida media tenderá a τ . Y no sólo eso: la teoría de la probabilidad permite predecir no sólo las *propiedades medias*, sino también las *desviaciones de la media* que se producirán en un agregado de elementos. Existe un conocido teorema según el cual las fluctuaciones medias con respecto al valor medio de una cierta propiedad vienen dadas por la expresión $\frac{1}{\sqrt{n}}$ (en tanto por uno), siendo n el número de elementos considerados al realizar dicha media. Así, por ejemplo, en una agrupación de 10^{10} átomos radiactivos se puede atribuir a cada átomo individual una vida igual a τ con un error medio relativo de sólo 10^{-5} . Al igual que ocurre con otros muchos fenómenos físicos, lo que a escala atómica es un suceso de naturaleza aleatoria se impone macroscópicamente como una férrea *ley determinista*.⁴

⁴Ver DAVID BOHM: *Causality and Chance in Modern Physics*. Londres, 1984 (1ª ed., 1957): Routledge & Kegan Paul.

En efecto, a nivel macroscópico podemos asegurar que el número de átomos de una sustancia radiactiva viene expresado por la siguiente ecuación diferencial:

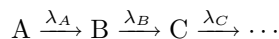
$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N(t).$$

Si se integra dicha ecuación diferencial imponiéndole la condición de contorno $N_{t=0} = N_0$, se obtiene la siguiente solución:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}.$$

Para representar gráficamente esta ecuación, se emplea un sistema de coordenadas cartesianas en el que se representa el tiempo en el eje de abscisas y el número de átomos en el de ordenadas.

Es lógico pensar que, en ocasiones, el hijo de un nucleido radiactivo será también radiactivo y se desintegrará en un tercer núcleo que, a su vez, puede ser estable o radiactivo, etcétera. Se establece así una *cadena de desintegración radiactiva* de mayor o menor extensión:



En este caso, puede calcularse el número de átomos de cada una de las especies radiactivas mediante la siguiente ecuación, propuesta por BATEMAN en 1910:

$$N_i(t) = \lambda_1 \lambda_2 \cdots \lambda_{i-1} \sum_{j=1}^i \frac{e^{-\lambda_j t}}{\prod_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^i (\lambda_k - \lambda_j)}.$$

1. prop.

Problema 8 Obtener la evolución temporal del número de átomos de los nucleidos A y B en función de los valores que tomen λ_A y λ_B . Asigne cuatro parejas de valores significativos a λ_A y λ_B . Compare las evoluciones que obtiene para las distintas parejas de valores (λ_A, λ_B) y señale alguna de las características que más le llame la atención para cada una de las parejas de valores (λ_A, λ_B) .

Conceptos En este problema, tenemos *dos* nucleidos, de constantes de desintegración λ_A y λ_B . Particularizando la ecuación de BATEMAN para cada uno de estos dos radionucleidos, obtendríamos:

$$\begin{aligned} N_A(t) &= \lambda_A \lambda_B N_{A_0} e^{-\lambda_A t}, \\ N_B(t) &= \lambda_A \lambda_B N_{B_0} \left[e^{-\lambda_A t} + \frac{e^{-\lambda_B t}}{\lambda_A - \lambda_B} \right]. \end{aligned}$$

Resolución Se tomarán cuatro parejas de valores, con el siguiente criterio: en la *primera*, e tomarán tiempos de desintegración similares, del orden de *días*; en la *segunda*, tiempos también similares, pero del orden de *miles de años*; en la *tercera*, el período de semidesintegración del nucleido padre será mucho mayor

Figura 31: Captura de pantalla del manejo del programa Phrad.

que el del nucleido hijo; por último, en la *cuarta*, el período de semidesintegración del hijo sea mucho mayor que el del padre.

Los tiempos característicos se tomarán de la selección de problemas del *Cuaderno de prácticas de simulación computacional*. Así, se tendrá:

	λ_A	λ_B
1	18,7 días	11,4 días
2	$4,5 \cdot 10^9$ años	1632 años
3	1600 años	3,82 días
4	0,8 horas	8000 horas

Los datos introducidos en el programa Phrad para la obtención de la primera gráfica vienen indicados en la figura (31). Las gráficas para cada una de las cuatro parejas de radionucleidos aparecen en las figuras (32, 33, 34 y 35).

Es necesario tener en cuenta que el Phrad no proporciona directamente gráficas de evolución el número de átomos de un nucleido radiactivo en función del tiempo, sino sólo gráficas de evolución de su *actividad*. Se mida ésta en curios o en becquerelios, siempre corresponde a una medida de *número de desintegra-*

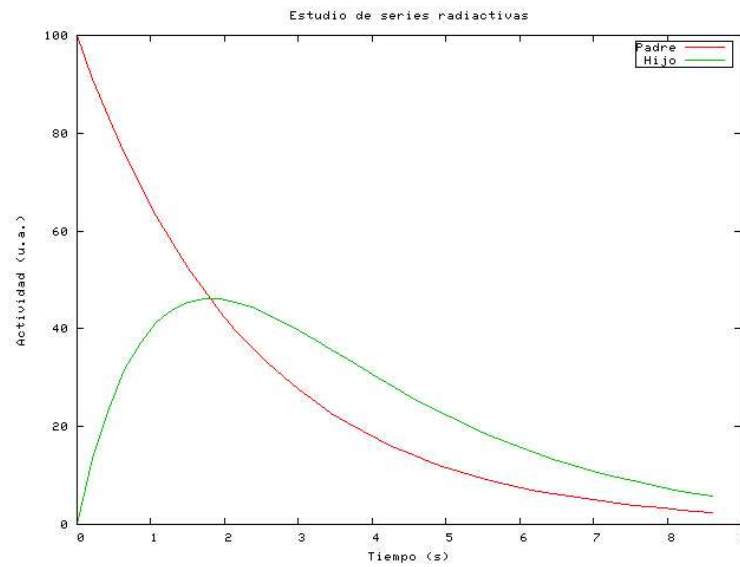


Figura 32: Gráfica de Phrad para la *primera* pareja de nucleidos.

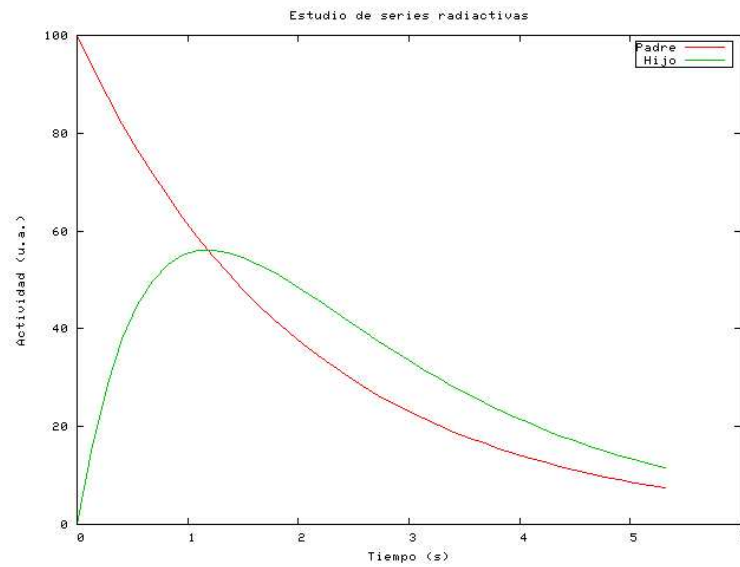


Figura 33: Gráfica de Phrad para la *segunda* pareja de nucleidos.

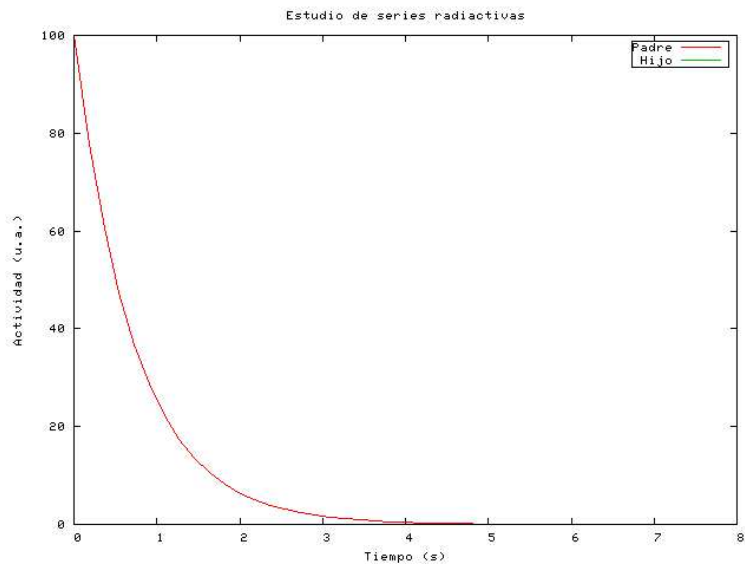


Figura 34: Gráfica de Phrad para la *tercera* pareja de nucleidos.

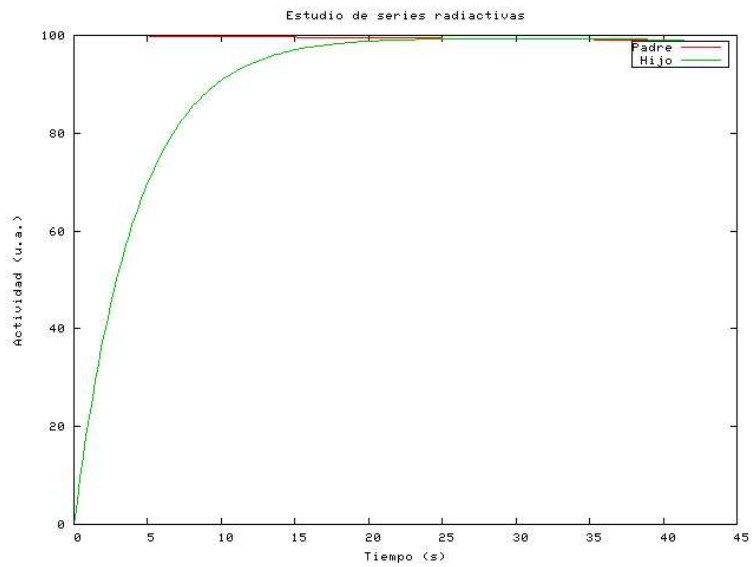


Figura 35: Gráfica de Phrad para la *cuarta* pareja de nucleidos.

ciones en un cierto lapso de tiempo. Obviamente, la actividad es una magnitud relacionada con el número de átomos del nucleido en cuestión: a más átomos, más desintegraciones. Pero la actividad depende también del período de desintegración: si se trata de un período muy largo, la actividad será muy baja y, si se ha establecido un valor elevado de su actividad inicial, éste decaerá rápidamente. Pero este decaimiento no debe confundirse con el decaimiento del propio número de átomos del nucleido radiactivo. Esta consideración es importante a la hora de analizar la información que nos proporcionan las gráficas.

- La *primera* gráfica corresponde, como ya se dijo, a una situación en la que ambos radionucleidos poseen tiempos similares de desintegración, siendo éste del orden de los *días*. La gráfica, en este sentido, muestra una situación paradigmática: a medida que transcurre el tiempo, decae la actividad del nucleido padre, se forman átomos del hijo y, consecuentemente, la actividad del elemento B aumenta hasta llegar a un cierto máximo, que ocurre a los 2 segundos. En este momento, aproximadamente, se alcanza el *equilibrio isotópico*: la actividad del padre iguala a la del hijo, situándose ambas en torno a unas 45 unidades de actividad. A partir de ese instante, ambas actividades decaen, si bien la del padre lo hace a un ritmo superior a la del hijo.
- La *segunda* gráfica corresponde a una situación en la que ambos nucleidos poseen también tiempos similares de desintegración, pero éstos se encuentran en el orden de los *miles de años*. La gráfica, en la que se han seleccionado las mismas actividades iniciales que la anterior, resulta ser muy similar a la primera; la única diferencia es que el equilibrio isotópico se alcanza un poco antes (a los 1,5 segundos aproximadamente) y para un nivel de actividad algo mayor (unas 55 unidades de actividad).
- La *tercera* gráfica corresponde a una situación en la que el período de desintegración del padre es mucho *mayor* que el del hijo. Aquí tenemos una situación curiosa: la actividad del hijo es prácticamente inexistente. La explicación radica en que, en la escala de tiempo considerada en la gráfica, apenas sí se desintegrarán átomos del nucleido padre dando lugar a nucleidos del hijo. La actividad del primero, además, decae rápidamente desde el valor inicial establecido: a los cuatro segundos, es prácticamente nula.
- En la *cuarta* gráfica nos encontramos con una situación básicamente opuesta: el período de semidesintegración del padre es mucho *menor* que el del hijo. La actividad del padre, en consecuencia, se mantiene a valores relativos muy altos, ocasionando un aumento muy rápido del número de átomos del hijo y, consecuentemente, de su actividad. Al ser el período de desintegración del hijo muy largo, su actividad no decae prácticamente a lo largo de la escala temporal de la gráfica. Se alcanza el equilibrio isotópico entre ambos nucleidos, pero en tiempos (30–40 segundos, aunque no se aprecia bien en la gráfica) y para actividades (casi 100 unidades de actividad) muy superiores a los de las dos primeras gráficas obtenidas.