

08.71.04

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 1	AÑO 1971

CNEA/EN - 20/53

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

GERENCIA DE ENERGIA

DEPARTAMENTO DE REPROCESAMIENTO

QUEMADOS BAJOS DE COMBUSTIBLES CON URANIO
EN REACTORES TERMICOS

por

J. FLEGENHEIMER

Buenos Aires

Julio 1971

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION
GERENCIA DE ENERGIA
DEPARTAMENTO DE REPROCESAMIENTO

QUEMADOS BAJOS DE COMBUSTIBLES CON URANIO
EN REACTORES TERMICOS

por

J. FLEGENHEIMER

Buenos Aires

Julio 1971

RESUMEN

Se plantean las ecuaciones básicas para expresar el quemado de elementos combustibles en los cuales la contribución por fisión de plutonio pueda despreciarse. El quemado se expresa en parámetros de utilidad en el reprocesamiento de elementos combustibles y se adjuntan gráficos. Los valores hallados durante el reprocesamiento de la primera carga del RA-1 se usan como ejemplo.

ABSTRACT

Basic burn-up equations are derived for the case of a negligible contribution of plutonium fissions. The equations and their graphs are intended for application to the reprocessing of fuel elements. The data found during the reprocessing of the first charge of the RA-1 reactor are used as an example.

1. INTRODUCCION

Cuando opera un reactor su combustible original se transforma por procesos nucleares, principalmente por captura de neutrones y por fisión, creando núcleos distintos. Estos procesos dependen de constantes nucleares, como períodos de semidesintegración y secciones eficaces, y de las condiciones de operación del reactor, como flujos y espectros de neutrones y tiempos de irradiación.

En un reactor en operación, la velocidad del quemado (es decir del fisiónado) del combustible, puede medirse por el calor desprendido, por ejemplo por medio de instrumentos en el circuito de refrigeración. La potencia térmica del reactor es entonces proporcional al nivel del quemado de combustible y por lo tanto también al flujo de neutrones mientras el combustible no cambie apreciablemente de composición, es decir para quemados bajos.

El objeto de la presente nota es presentar las equivalencias entre la potencia térmica de un reactor, o su energía térmica entregada, y varios valores físicos de interés general, en especial para el reprocesamiento de elementos combustibles.

2. QUEMADO

El quemado (burn-up) de elementos combustibles irradiados que salen de un reactor suele expresarse en unidades de Megawatt.día/tonelada de combustible (MWd/T), es decir en dimensión de energía térmica entregada por unidad de peso de combustible. Si se conoce la composición original del combustible, esta expresión equivale a un valor en flujo integrado por uni-

dad de peso de combustible, o a porcentaje de núcleos fisiónables originalmente presentes consumidos durante la irradiación. También puede ser convertida a la actividad por unidad de elemento combustible si se conocen mas datos sobre la irradiación.

Los datos de quemado, expresados en MWd/T por reacto-ristas, suelen necesitarse en fisiones por unidad de peso para uso de metalurgistas interesados en cambios estructurales, y en flujos integrados para uso de radioquímicos enteresados en la producción de nucleídos formados por captura. Los valores de la actividad por unidad de peso de elemento combustible son de importancia para determinar el número de ciclos necesarios en plantas de reprocesamiento y para los cálculos de blindaje.

Debe tenerse en cuenta que el término "quemado" se refiere aquí exclusivamente a fisiones producidas, mientras que el uranio en un reactor puede consumirse por otras razones. Esta distinción entre uranio fisionado y uranio consumido debe tenerse siempre presente.

A continuación se hará referencia unicamente a reactores térmicos que quemen uranio natural o enriquecido, adoptando para los cálculos los símbolos y valores numéricos recopilados en la Tabla I. Esto significa idealizar el caso de un reactor real, donde el espectro de neutrones influye sobre los valores de las secciones eficaces y los rendimientos en fisión.

3. RELACION ENTRE ^{235}U CONSUMIDO Y FLUJO INTEGRADO

El uranio natural o enriquecido está compuesto por tres isótopos, los de número de masa 234, 235 y 238, que son todos emisores alfa con períodos largos. En el caso de uranio enri-

- σ_c : sección eficaz de captura para la reacción (n, γ)
 σ_f : sección eficaz de fisión para la reacción (n,fisión)
 $\sigma_T = \sigma_c + \sigma_f$
 N_5 : número de núcleos de ^{235}U
 ϕ : flujo térmico en n/cm².s
 ϕt : flujo integrado en n/cm²
 x : porcentaje de ^{235}U consumido (fisión + captura)
 y : porcentaje de enriquecimiento en ^{235}U
 Y_i : porcentaje de rendimiento en fisión del producto i
 λ_i : constante de desintegración del producto i
 N_i : número de núcleos del producto i
 A_i : actividad del producto i
 $F_i^0 = Y_i (1 - e^{-\lambda_i t})$
 $F_i^{t'} = Y_i (1 - e^{-\lambda_i t}) e^{-\lambda_i t'}$
 t : tiempo de operación
 t' : tiempo de enfriamiento

Constantes usadas:

Número de Avogadro = $6,02 \cdot 10^{23}$ núcleos/mol

1 año = $3,156 \cdot 10^7$ s

Para ^{235}U : $\sigma_c = 580$ b
 $\sigma_f = 100$ b

Peso atómico de uranio de cualquier enriquecimiento: 238

Para ^{137}Cs : $T = 30,0$ a
 $Y_{cs} = 6,17$

TABLA 1 Símbolos y constantes usadas

quecido que ha sido reciclado, también puede estar presente el ^{236}U . De estos isótopos de uranio, el único fisiónable con neutrones térmicos es el ^{235}U y es el único que se utilizará aquí para los cálculos numéricos. Dado que el ^{238}U puede fisiónar con neutrones de energía superior a 1 MeV y que una pequeña fracción de estos neutrones está presente en el espectro de un reactor térmico, se introduce un error por despreciar este efecto que puede llegar a algunos porcientos.

Si no hay recambio de elementos combustibles en un reactor, el ^{235}U original se consume por los siguientes tres efectos principales:

- 1) por desintegración natural según la ley:

$$-\frac{dN_5}{dt} = \lambda_5 N_5$$

- 2) por captura de neutrones para formar ^{236}U según:

$$-\frac{dN_5}{dt} = \sigma_c \phi N_5$$

- 3) por captura de neutrones con fisión según:

$$-\frac{dN_5}{dt} = \sigma_f \phi N_5 \quad (3.1)$$

de modo que el efecto combinado es:

$$-\frac{dN_5}{dt} = (\lambda_5 + \sigma_f \phi) N_5 \quad \text{donde } \sigma_c + \sigma_f = \sigma_f$$

Como el período de semidesintegración de ^{235}U es muy largo, $\lambda_5 = 3,1 \cdot 10^{-17} \text{ s}^{-1}$, este efecto de su radiactividad natural es despreciable en cuanto a su consumo. Aún en un reactor con un flujo bajo de $10^{12} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ el valor de $\sigma_f \phi = 6,8 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1}$.

Queda entonces:

$$-\frac{dN_5}{dt} = \sigma_f \phi N_5$$

que integrada da: $\frac{N_5}{N_5^0} = e^{-\sigma_T \phi t}$

donde N_5/N_5^0 es la fracción existente al tiempo t respecto del ^{235}U originalmente presente. Expresándolo en función del porcentaje de ^{235}U consumido durante la irradiación se tendrá:

$$10^{-2} x = \frac{N_5^0 - N_5}{N_5^0} = 1 - e^{-\sigma_T \phi t}$$

$$x = 10^2 (1 - e^{-\sigma_T \phi t}) \quad (3.2)$$

Para valores pequeños del exponente, es decir $\phi t \leq 10^{20}$, puede desarrollarse la exponencial, con lo cual:

$$x = 10^2 \sigma_T \phi t ,$$

y reemplazando σ_T por su valor:

$$x = 6,8 \cdot 10^{-20} \cdot \phi t. \quad (3.3)$$

ϕt representa el flujo integrado; si el flujo no fuera constante durante el tiempo de la irradiación, la expresión correcta sería $\int_0^t \phi dt$.

La ecuación (3.2) ha sido representada en la Fig. 1.

4. RELACION ENTRE ENERGIA TERMICA ENTREGADA POR EL REACTOR Y NUMERO DE FISIONES

El dato fundamental para esta conversión es la energía producida durante una fisión promedio, que es de aproximadamente 205 MeV distribuidos de la siguiente manera [1]:

energ. cinét. de prod. fis.	167 ± 5	MeV
rayos gamma instantáneos	6 ± 1	
energ. cinét. de neutr. fis.	5 ± 0,5	
desintegr. de prod. fis.:		
energía gamma	6 ± 1	
energía beta	8 ± 1,5	
neutrinos	12 ± 2,5	
energía total por fisión	204 ± 7	MeV

La energía de los neutrinos se pierde, de modo que debe ser descontada del total. Se recupera en cambio la energía producida por los neutrones de fisión al dar reacciones (n,γ) y de tal modo la energía total disponible vuelve a un valor de 205 MeV aproximadamente.

Con el valor de 205 MeV/fisión se obtiene (apéndice A):

$$1 \text{ Watt} \text{ ————— } 3,05 \cdot 10^{10} \text{ fis/s} \quad (4.1)$$

La relación entre energía térmica suministrada y el número de fisiones es entonces:

$$1 \text{ MWd (Megawatt.día)} \text{ ————— } 2,63 \cdot 10^{21} \text{ fisiones} \quad (4.2)$$

5. RELACION ENTRE POTENCIA DEL REACTOR Y FLUJO PROMEDIO

El número de fisiones producido por neutrones térmicos en ^{235}U se rige por la ecuación (3.1) anterior:

$$-\frac{dN_s}{dt} = \sigma_f \phi N_s = \text{núm. de fis./unidad de tiempo} \quad (3.1)$$

Comparando (3.1) con (4.2) y reemplazando σ_f por su

valor, se obtiene:

$$\text{valor en MWd} = 2,21 \cdot 10^{-43} \cdot N_5 \cdot \phi t \quad (5.1)$$

donde t se expresa en segundos y N_5 es el número de átomos de ^{235}U originales en la masa de combustible considerada. Por esta razón se elige la tonelada métrica de uranio metálico como la unidad^(x). Para calcular N_5 hace falta conocer el enriquecimiento original del combustible y su peso atómico. Para este último se tomará 238, a pesar de que puede variar entre 235,040 para ^{235}U puro y 238,047 para ^{238}U puro [2]. Definiendo:

$$y (\%) = \frac{N_5}{N_{\text{U total}}} \times 100$$

se obtiene:

$$\text{valor en } N_5/T = 2,53 \cdot 10^{25} \cdot y$$

con lo cual, de (5.1):

$$\text{valor en MWd/T} = 5,59 \cdot 10^{-18} \cdot \phi t \cdot y \quad (5.2)$$

o también:

$$\text{valor en MW/T} = 4,83 \cdot 10^{-13} \cdot \phi \cdot y \quad (5.3)$$

En la Fig. 2 se encuentran las equivalencias entre los valores de quemado expresados en MWd/T y flujos integrados según varios valores de enriquecimiento. Los flujos medios necesarios para alcanzar una potencia específica de 1 MW/T se han indicado en la Fig. 3 en función de la concentración porcentual en ^{235}U .

(x) En publicaciones estado-unidenses a veces se usa la tonelada corta.

6. RELACION ENTRE ENERGIA ENTREGADA Y CANTIDAD DE ^{235}U FISIONADO, O DE PRODUCTOS DE FISION PRODUCIDOS

Otro dato que puede ser de interés es la masa de productos de fisión producidos durante la irradiación, que es aproximadamente igual a la masa de ^{235}U fisionada. La cantidad total de ^{235}U consumida es mayor, puesto que interviene también su captura con formación de ^{236}U . Se supondrá a continuación que solo se producen fisiones en ^{235}U , lo cual es válido para quemados bajos ($\phi t < 10^{20}$), o para enriquecimientos muy altos. En estos casos, para irradiación a potencia constante:

$$\text{masa de } ^{235}\text{U fisionada} = \text{núm. de fis.} \cdot \frac{235}{6 \cdot 10^{23}} \text{ g}$$

con lo cual, de (4.2):

$$\begin{aligned} \text{valor en MWd} &= \frac{\text{masa } ^{235}\text{U fisionada (g)} \cdot 6 \cdot 10^{23}}{235 \cdot 2,63 \cdot 10^{21}} \\ &= 0,973 \cdot ^{235}\text{U fisionado (g)} \end{aligned}$$

o sea que muy aproximadamente:

$$1 \text{ MW} \equiv 1 \text{ g } ^{235}\text{U fision.}/\text{día} \equiv 1 \text{ g prod.fis.}/\text{día} \quad (6.2)$$

La relación entre el quemado y el porcentaje de ^{235}U consumido puede obtenerse por comparación de (3.3) y (5.2):

$$\text{valor en MWd/T} = 82 \times y \quad (6.3)$$

En la Fig. 4 se ha representado el porcentaje de ^{235}U consumido para un quemado de 1000 MWd/T en función del enriquecimiento.

7. LA ACTIVIDAD DE UN PRODUCTO DE FISION INDIVIDUAL

La fisión de ^{235}U por neutrones térmicos es preponderantemente asimétrica y da origen a la conocida curva de distribución de productos de fisión con doble máximo. Llamando Y_i al porcentaje de rendimiento de un producto de fisión individual i , el número de estos núcleos formados por unidad de tiempo de irradiación será:

$$\frac{dN_i}{dt} = 10^{-2} N_5 \sigma_f \phi Y_i \quad (7.1)$$

En el caso de tratarse de nucleídos radiactivos, estos desintegrarán según la ley:

$$-\frac{dN_i}{dt} = \lambda_i N_i \quad (7.2)$$

de modo que el número neto producido por unidad de tiempo de operación es:

$$\frac{dN_i}{dt} = 10^{-2} N_5 \sigma_f \phi Y_i - \lambda_i N_i \quad (7.3)$$

La integración de (7.3) da, para $N_i = 0$ al tiempo $t = 0$:

$$N_i = \frac{10^{-2} N_5 \sigma_f \phi Y_i}{\lambda_i} (1 - e^{-\lambda_i t}) \quad (7.4)$$

donde t es el tiempo de operación y se ha supuesto N_5 y ϕ constantes. Si se ha retirado el material del reactor y se lo ha dejado enfriar durante un tiempo t' , el número de núcleos habrá desintegrado a un valor:

$$N_i^{t'} = \frac{10^{-2} N_5 \sigma_f \phi Y_i}{\lambda_i} (1 - e^{-\lambda_i t}) e^{-\lambda_i t'} \quad (7.5)$$

o expresado en actividad A_i :

$$\begin{aligned} A_i^{t'} &= 10^{-2} N_5 \sigma_f \phi Y_i (1 - e^{-\lambda_i t}) e^{-\lambda_i t'} \\ &= 10^{-2} N_5 \sigma_f \phi F_i^{t'} \end{aligned} \quad (7.6)$$

donde $N_5 \sigma_f \phi$ es el número de fisiones por unidad de tiempo y los demás factores, que dependen del producto de fisión individual, han sido agrupados en un solo factor $F_i^{t'}$. Se llamará F_i^0 al mismo factor para tiempo de enfriamiento nulo, de modo que se tiene:

$$A_i^0 = A_i^{t'} e^{\lambda_i t'} = 10^{-2} N_5 \sigma_f \phi F_i^0 \quad (7.7)$$

Para un producto de fisión hija de otro se puede plantear su ecuación en forma similar. Si solo es producido por desintegración de su antecesor se obtiene:

$$\begin{aligned} A_2^{t'} &= 10^{-2} N_5 \sigma_f \phi Y_i \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} - \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} \right) e^{-\lambda_2 t'} \\ &= 10^{-2} N_5 \sigma_f \phi F_2^{t'} \end{aligned} \quad (7.8)$$

En estas ecuaciones no se ha tenido en cuenta la desaparición de los productos de fisión durante la irradiación por su captura de neutrones, proceso que puede ser importante para flujos muy altos. En tal caso, (7.2) se transforma en:

$$-\frac{dN_i}{dt} = (\lambda_i + \sigma_{z_i} \phi) N_i = \Lambda_i N_i \quad (7.9)$$

pero de esta manera el factor F_i ya no es independiente del flujo.

Los datos de los rendimientos acumulativos Y , es decir para toda la cadena isobárica de fisión, pueden encontrarse en [3], donde también se hallan los valores de los períodos.

Puede suceder también que las irradiaciones en un reactor no se hagan en forma continua, sino que este opere en ciclos. Si los ciclos son iguales y constan de duraciones de tiempos de irradiación t y tiempos de enfriamiento t' , la actividad de un producto de fisión al cabo de n irradiaciones y $n-1$ enfriamientos es (apéndice B):

$$A_i^{\text{TOTAL}} = 10^{-2} N_5 \sigma_f \phi Y_i \left(\frac{t}{t+t'} \right) \left(1 - e^{-\lambda_i(t+t')} \right) \quad (7.10)$$

Esta ecuación vale para tiempos t y t' cortos respecto del período del producto de fisión i .

8. RELACION ENTRE EL QUEMADO Y LA ACTIVIDAD DE UN PRODUCTO DE FISION INDIVIDUAL

El dato de quemado para elementos combustibles irradiados puede hallarse midiendo la actividad de un producto de fisión individual por unidad de peso de combustible. Para una irradiación corta respecto del período del producto de fisión i , la ecuación (7.6) puede escribirse, al fin de la irradiación (es decir para tiempo de enfriamiento nulo):

$$A_i^0 = 10^{-2} N_5 \sigma_f \phi Y_i \lambda_i t \quad \text{para } t' = 0 \quad (8.1)$$

que en Curies y para una tonelada de combustible es:

$$A_i^0 (C_i / T_{\text{comb}}) = 3,97 \cdot 10^{-9} \phi t Y_i \lambda_i \quad (8.2)$$

donde λ_i y t deben expresarse en las mismas unidades de tiempo.

Comparando la expresión (8.2) con (5.2) se obtiene:

$$\text{valor en MWd/T} = 1,41 \cdot 10^{-9} \frac{A_i^0 (C_i / T_{\text{comb}})}{Y_i \lambda_i} \quad (8.3)$$

donde λ_i está expresado en s^{-1} .

Si el tiempo de enfriamiento t' ha sido apreciable, el valor de la actividad medida debe ser corregido mediante:

$$A_i^0 = A_i^{t'} e^{\lambda_i t'} = A_i^{t'} e^{1,72 t' / T_i} \quad (8.4)$$

donde λ_i ó T_i deben expresarse en las mismas unidades que t' . La ecuación (8.3) solo es válida para quemados bajos, es decir cuando el combustible no se ha consumido en forma considerable y cuando el tiempo de irradiación es corto con respecto al período. Si el tiempo de irradiación t no es despreciable en comparación con el período, puede usarse la ecuación (7.7), que para una tonelada de combustible es:

$$A_i^o (C_i/T_{\text{COMB}}) = A_i^{t'} (C_i/T_{\text{COMB}}) e^{\lambda_i t'} = 3,97 \cdot 10^{-9} \text{ y } \phi F_i^o \quad (8.5)$$

o sea:

$$\text{valor en MWd/T} = 1,22 \cdot 10^{-4} \frac{t(d)}{F_i^o} A_i^o (C_i/T_{\text{COMB}}) \quad (8.6)$$

donde t , la duración de la irradiación, está expresado en días.

9. VALORES DE QUEMADOS BAJOS EN BASE A LA ACTIVIDAD DE ^{137}Cs

Uno de los productos de fisión usados para determinaciones de quemado es el ^{137}Cs , que tiene ciertas ventajas sobre otros, como ser, un esquema de desintegración y rendimiento en fisión bien conocidos, un período muy largo, facilidad de medición por radiación gamma (a través del $^{137\text{m}}\text{Ba}$ en equilibrio), baja sección eficaz para captura de neutrones, etc. Tiene también sus desventajas. Entre estas puede mencionarse que para quemados altos puede presentar interferencia el ^{134}Cs . La principal sin embargo es que tiene como antecesor en la cadena isobárica un gas noble (^{137}Xe , 3,9 min). De este modo la deposición de ^{137}Cs en un elemento combustible durante la irradiación no es uniforme, ya que el gas se desplaza hacia la parte mas fría del mismo, por lo general la vaina y los extremos. También es relativamente volátil el mismo

cesio y en los elementos combustibles de alta temperatura hay migración apreciable.

De tal modo el ^{137}Cs sirve como indicador de quemado para aquellos elementos combustibles que no han sufrido roturas durante la irradiación y que se disuelvan enteramente. No es en cambio aplicable cuando se hace un tratamiento químico o mecánico por separado para eliminar el material de la vaina en la planta de reprocesamiento.

La ecuación (8.3) expresada para ^{137}Cs es:

$$\text{valor en MWd/T} = 0,312 A_{\text{Cs}}^{\circ} (C_i/T_{\text{COMB}}) \quad (9.1)$$

Para tiempos de irradiación apreciables, puede hallarse el factor F_{Cs}° en forma gráfica de la Fig. 5 y reemplazarlo en (8.6):

$$\text{valor en MWd/T} = 1,22 \cdot 10^{-4} \frac{t(d)}{F_{\text{Cs}}^{\circ}} A_{\text{Cs}}^{\circ} (C_i/T_{\text{COMB}}) \quad (9.2)$$

Para expresar el dato de quemado de la ecuación (8.6) en otras unidades pueden usarse:

$$\text{valor en fisiones/T} = 3,21 \cdot 10^{17} \frac{t(d)}{F_{\text{Cs}}^{\circ}} A_{\text{Cs}}^{\circ} (C_i/T_{\text{COMB}}) \quad (9.3)$$

$$\text{valor en } \phi t = 2,18 \cdot 10^{13} \frac{t(d)}{y F_{\text{Cs}}^{\circ}} A_{\text{Cs}}^{\circ} (C_i/T_{\text{COMB}}) \quad (9.4)$$

$$\text{valor en } X = 1,49 \cdot 10^{-6} \frac{t(d)}{y F_{\text{Cs}}^{\circ}} A_{\text{Cs}}^{\circ} (C_i/T_{\text{COMB}}) \quad (9.5)$$

Estas mismas ecuaciones, para tiempos de irradiación cortos, se reducen a:

$$\text{valor en fisiones/T} = 8,21 \cdot 10^{20} A_{\text{Cs}}^{\circ} (C_i/T_{\text{COMB}}) \quad (9.6)$$

$$\text{valor en } \phi t = 5,58 \cdot 10^{16} \frac{A_{Cs}^{\circ} (Ci/T_{comb})}{y} \quad (9.7)$$

$$\text{valor en } \chi = 3,81 \cdot 10^{-3} \frac{A_{Cs}^{\circ} (Ci/T_{comb})}{y} \quad (9.8)$$

10. EJEMPLO DE APLICACION

Los elementos combustibles que constituyeron la primera carga del reactor RA-1 tenían un enriquecimiento del 19,7 % en ^{235}U y fueron irradiados durante 320 días. Al disolverlos, 5,5 años después del fin de la irradiación, se encontró que la actividad promedio de ^{137}Cs era de 1,42 $\mu\text{Ci/mgU}$. Se desea saber el quemado del combustible.

Datos:	$t = 320$ días	$A_{Cs}^{t'} = 1420$ Ci/T
	$t' = 5,5$ a	
	$y = 19,7$	$T_{Cs} = 30$ a

La actividad A_{Cs}° se halla por medio de (8.4) con lo cual se obtiene:

$$\begin{aligned} A_{Cs}^{\circ} &= 1420 \cdot e^{\ln 2 \times 5,5/30} (Ci/T) = 1420 \cdot e^{0,127} \\ &= 1613 (Ci/T) \end{aligned}$$

Como el quemado es bajo, puede aplicarse (9.1), con lo cual:

$$\text{Quemado} = 0,312 \cdot 1613 \text{ MWd/T} = 503 \text{ MWd/T}$$

Con las fórmulas (9.6), (9.7) y (9.8) se obtienen los valores:

$$\begin{aligned} \text{fisiones/T} &= 1,32 \cdot 10^{24} \\ \phi t &= 4,57 \cdot 10^{18} \text{ n/cm}^2 \\ \chi &= 0,31 \% \end{aligned}$$

Aplicando las fórmulas (9.2) a (9.5) y obteniendo el valor de F_c° , de la Fig. 5 ($F_c^\circ = 0,12$), se obtienen valores que son un 4 % mayores que los anteriores.

BIBLIOGRAFIA

- [1] B.F. Rider et al. Report GEAP-3373 (1960)
- [2] J.H.E. Mattauch et al. Nucl. Physics 67, 1 (1965)
- [3] W. Seelmann-Eggebert et al. Chart of the nuclides (1968)

APENDICESA) Equivalencia entre watt y fisiones/s:

1 fisión ---- 205 MeV

$$1 \text{ eV} \text{ --- } 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ u.e.s.carga} \times \frac{1}{300} \text{ u.e.s.potencial}$$

$$= 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ erg} \qquad 10^7 \text{ erg} = 1 \text{ joule}$$

$$1 \text{ fisión} \text{ --- } 205 \cdot 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ erg} = 3,28 \cdot 10^{-4} \text{ erg}$$

$$= 3,28 \cdot 10^{-11} \text{ joule}$$

$$1 \text{ joule/s} = 1 \text{ watt}$$

$$1 \text{ watt} \text{ --- } \frac{1}{3,28 \cdot 10^{-11}} \text{ fis./s} = 3,05 \cdot 10^{10} \text{ fis./s}$$

B) Actividad de un producto de fisión para operaciones por ciclos:

Siendo n el número de irradiaciones y $n-1$ el número de tiempos de enfriamiento, al cabo de la primera irradiación la actividad del producto de fisión i será:

$$A_i = 10^{-2} N_5 \sigma_f \phi \gamma_i (1 - e^{-\lambda_i t}) \quad (7.4)$$

Esta actividad desintegrará durante los $n-1$ ciclos de enfriamiento e irradiación siguientes, de modo que su valor al fin de la última irradiación será:

$$A'_i = 10^{-2} N_5 \sigma_f \phi \gamma_i (1 - e^{-\lambda_i t}) e^{-\lambda_i (n-1)(t'+t)}$$

Durante la segunda irradiación nuevamente se produce la actividad

$$A_i = 10^{-2} N_5 \sigma_f \phi \gamma_i (1 - e^{-\lambda_i t})$$

que ahora desintegrará hasta:

$$A_i^2 = 10^{-2} N_5 \sigma_f \phi Y_i (1 - e^{-\lambda_i t}) e^{-\lambda_i (n-2)(t'+t)}$$

y así sucesivamente para las n irradiaciones, hasta:

$$A_i^n = 10^{-2} N_5 \sigma_f \phi Y_i (1 - e^{-\lambda_i t})$$

La suma de estas n actividades, que será la total del producto de fisión i al cabo de la última irradiación, forma una progresión geométrica del tipo:

$$\sum^n A_i = K + K e^b + K e^{2b} + \dots + K e^{(n-1)b} = K \left(\frac{1 - e^{nb}}{1 - e^b} \right)$$

donde $K = 10^{-2} N_5 \sigma_f \phi Y_i (1 - e^{-\lambda_i t})$ y $b = -\lambda_i (t' + t)$

$$\text{Por lo tanto } A_i^{\text{TOTAL}} = 10^{-2} N_5 \sigma_f \phi Y_i (1 - e^{-\lambda_i t}) \left[\frac{1 - e^{-n\lambda_i(t+t')}}{1 - e^{-\lambda_i(t+t')}} \right]$$

Si además los tiempos t y t' son pequeños respecto del período del producto de fisión i , se pueden expandir los términos exponenciales respectivos, obteniendo:

$$A_i^{\text{TOTAL}} = 10^{-2} N_5 \sigma_f \phi Y_i \left(\frac{t}{t+t'} \right) \left[1 - e^{-n\lambda_i(t+t')} \right] \quad (7.10)$$

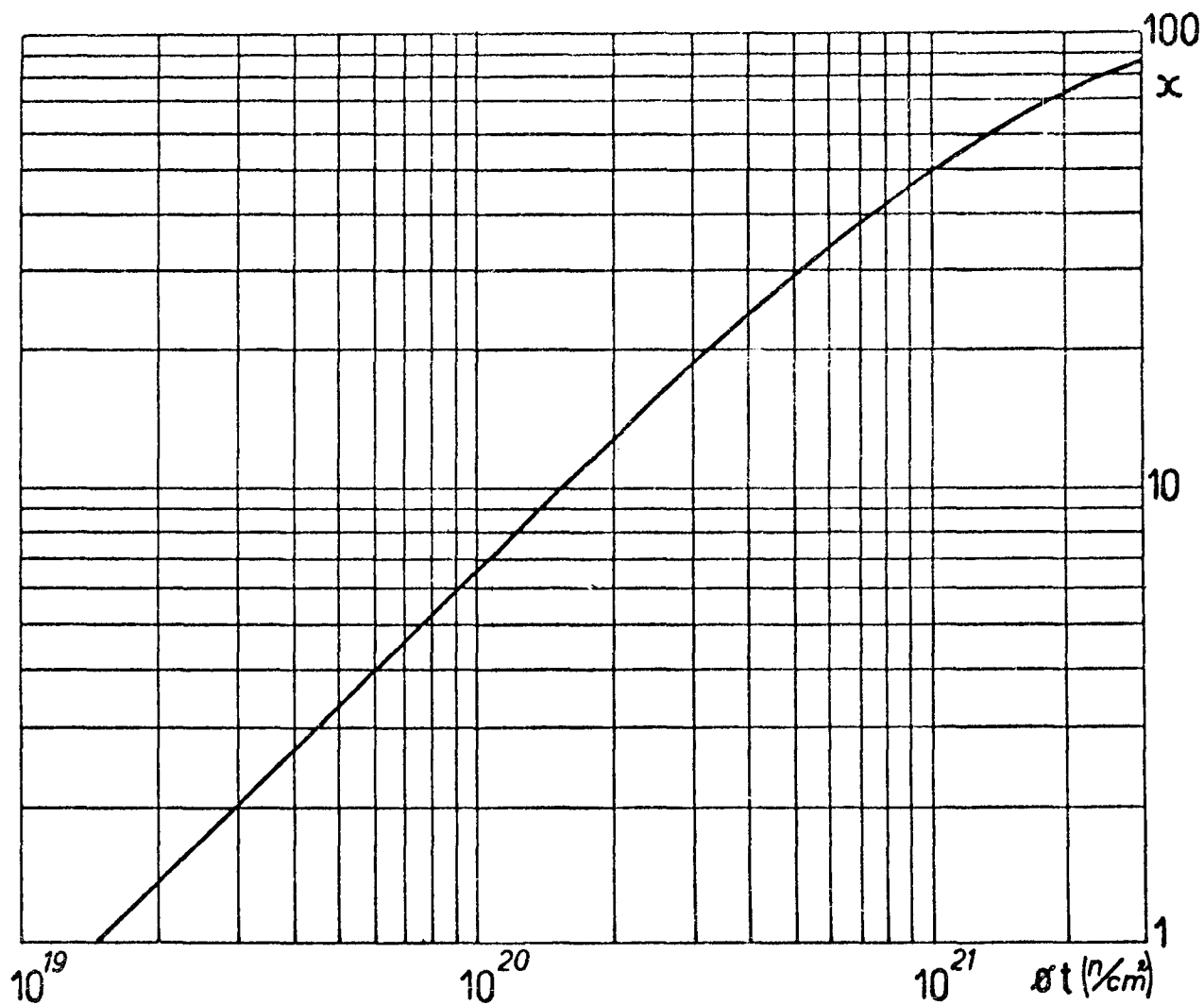


FIGURA 1

El porcentaje de ^{235}U consumido respecto del ^{235}U original (x), en función del flujo integrado (ϕt)

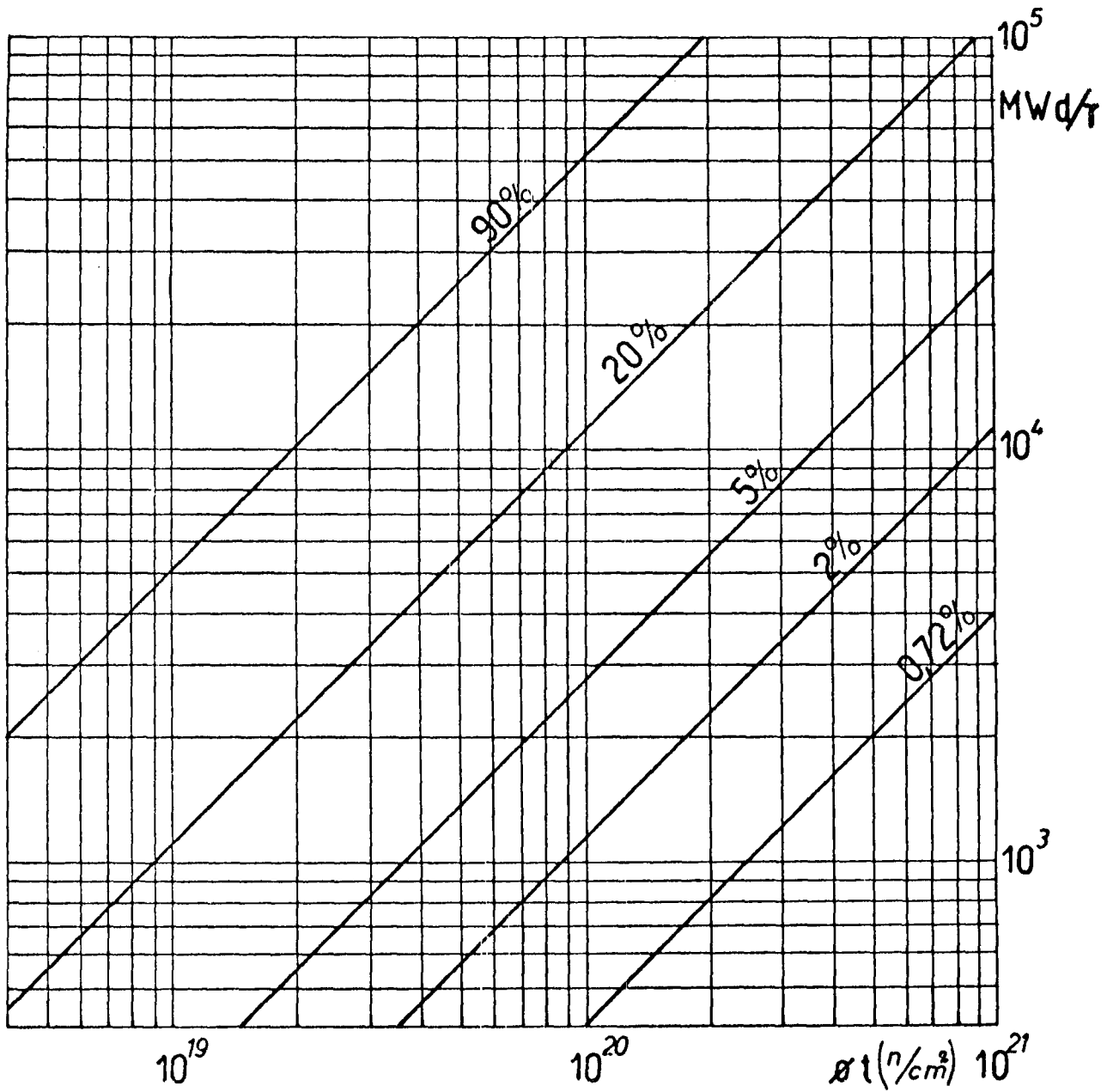


FIGURA 2

Equivalencia entre el quemado en MWd/T y flujos integrados ϕt para diferentes enriquecimientos

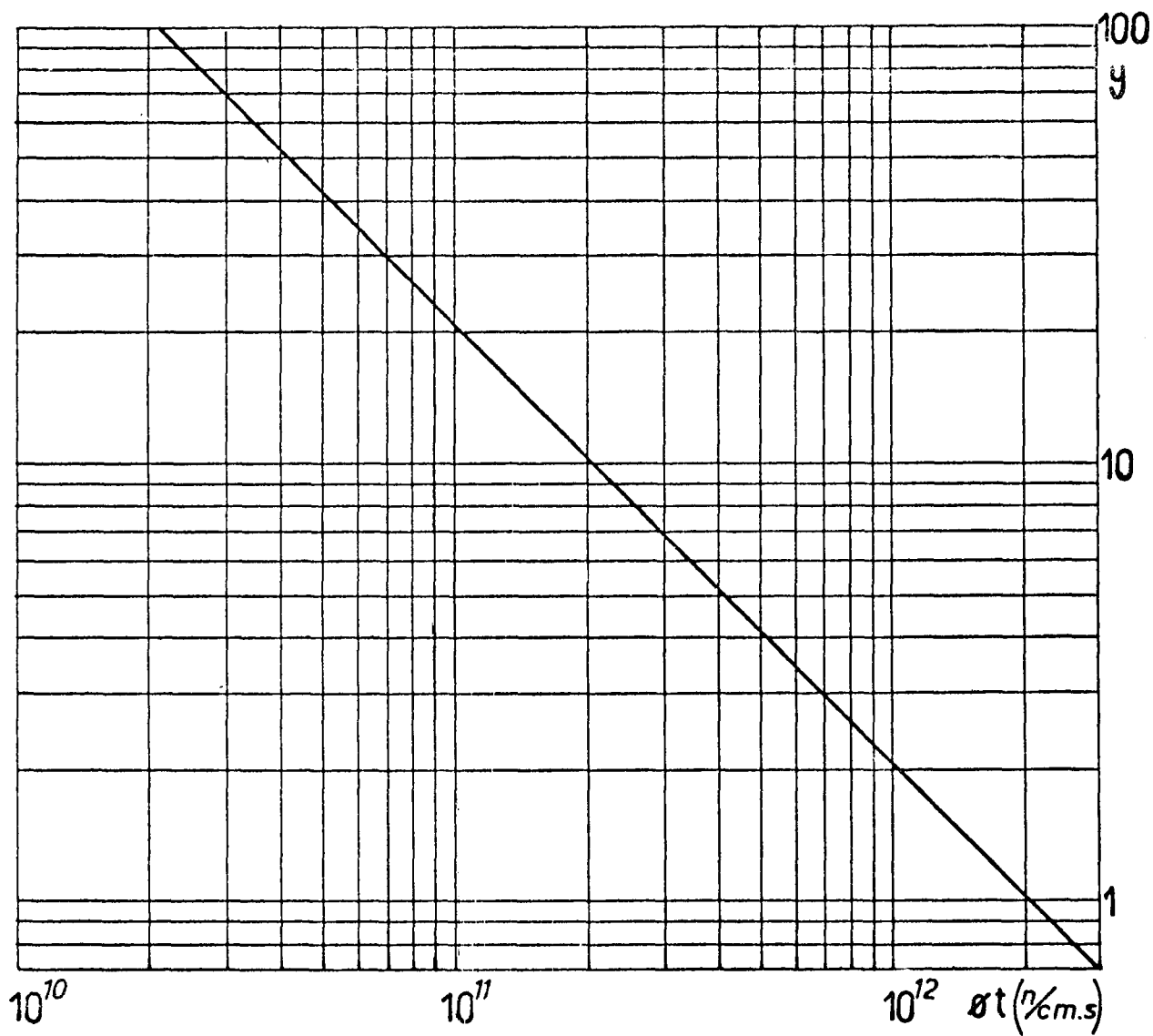


FIGURA 3

Flujos medios necesarios para una potencia
específica de 1 MW/T según el enriquecimiento
y del uranio

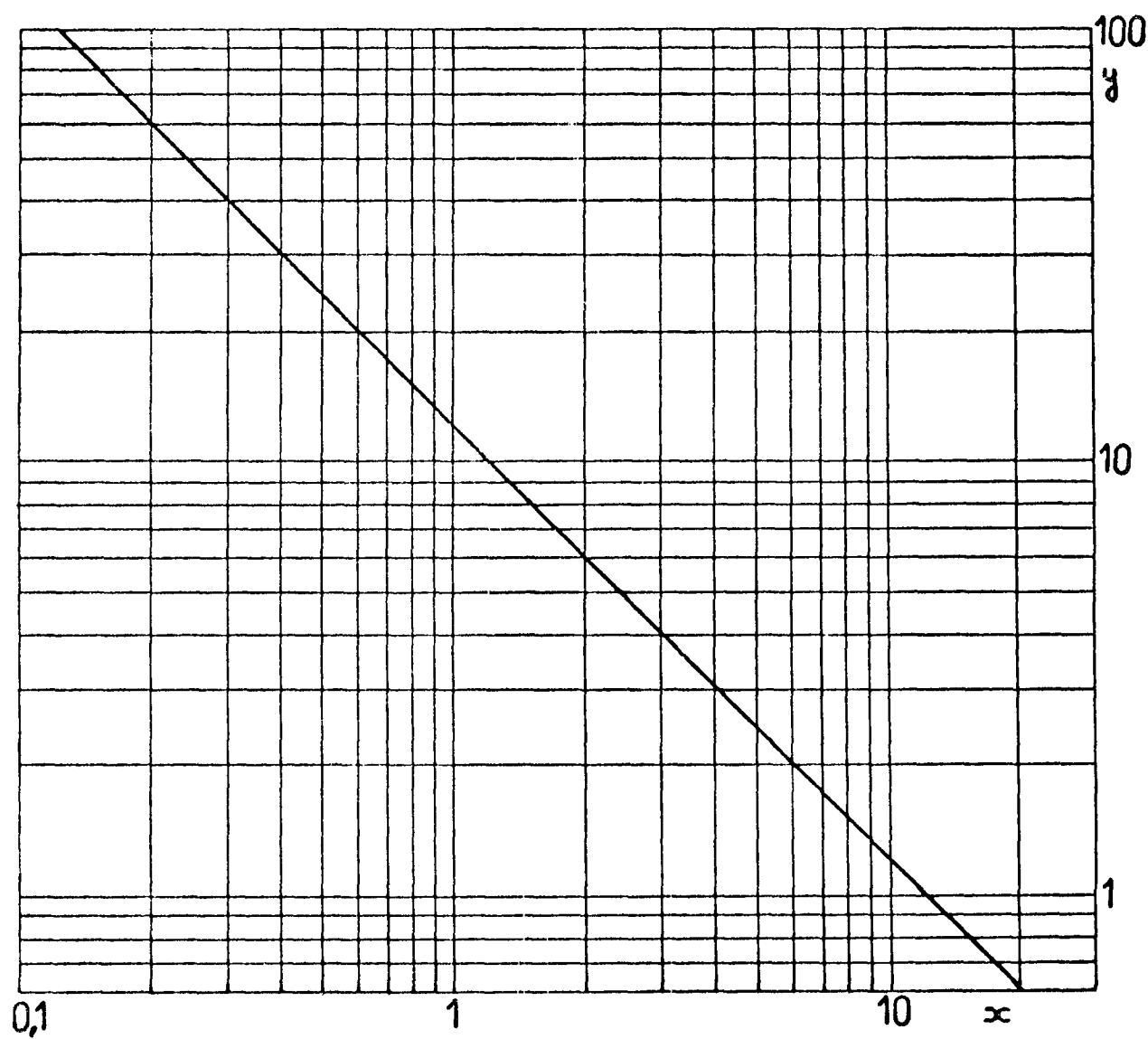


FIGURA 4

Porcentaje de ^{235}U consumido (x) para un quemado de 1000 MWd/T en función del enriquecimiento (y)

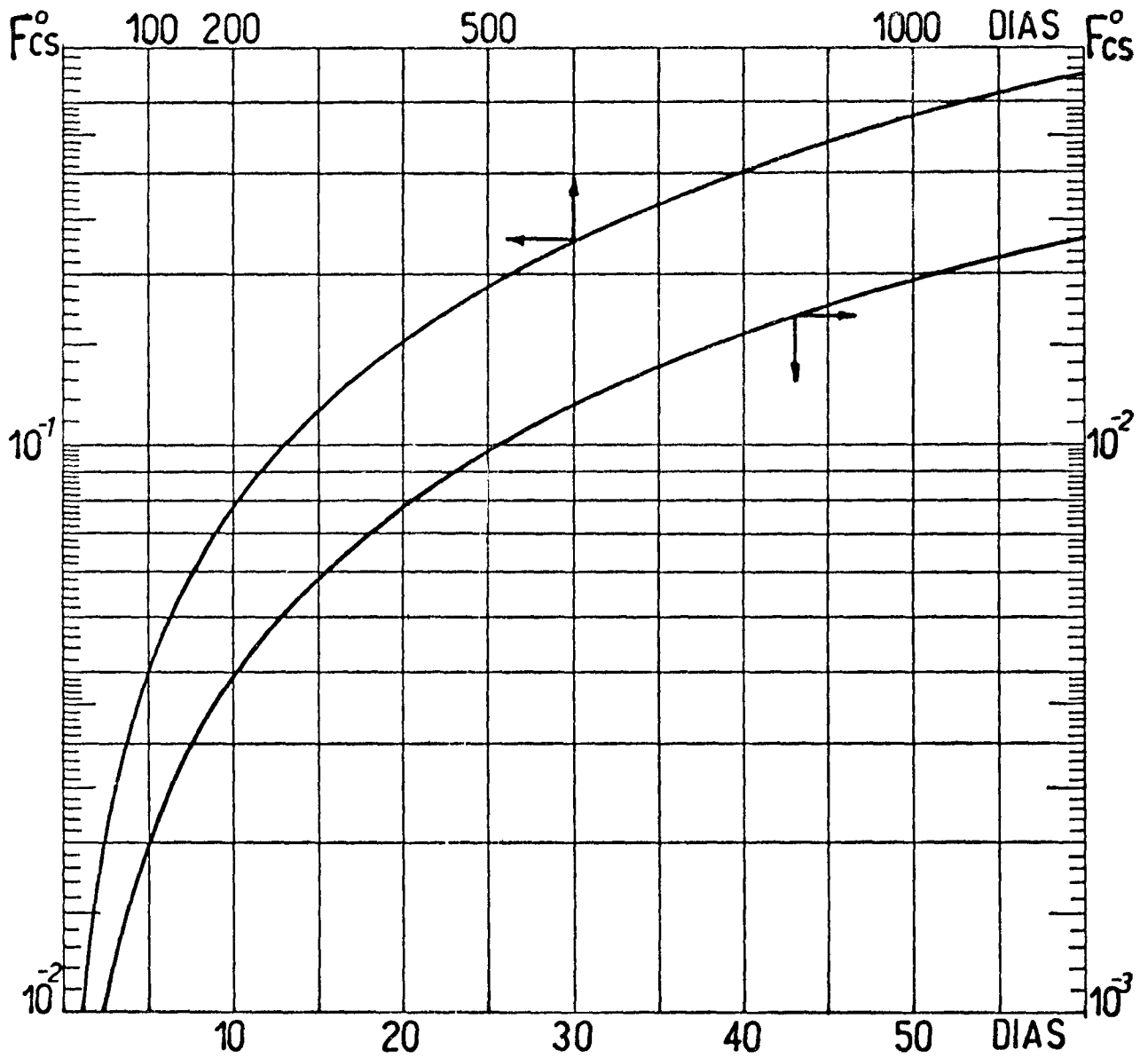


FIGURA 5

Factor de producción de ^{137}Cs para la fisión térmica de ^{235}U , F_{cs}° , en función del tiempo de operación