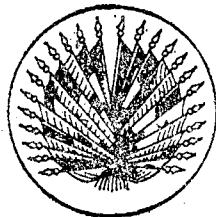


08.78.13



COMISION INTERAMERICANA DE ENERGIA NUCLEAR Y
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA DE LA REPUBLICA ARGENTINA



**CURSO LATINOAMERICANO DE INGENIERIA NUCLEAR
ORIENTADO A LA CAPACITACION BASICA PARA LA
IMPLEMENTACION DE PROGRAMAS NUCLEOELECTRICOS**

CNEA AC-57/78

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
NO	AÑO
1	1978

INTRODUCCION A LA FISICA DE REACTORES

Prof.: Dr. NESTOR B. PIERONI

BUENOS AIRES - ARGENTINA

OCTUBRE - 1978

INTRODUCCION A FISICA DE REACTORES

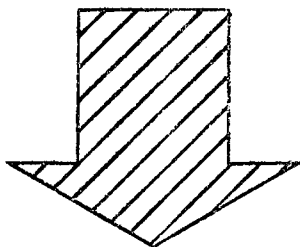
NOCIONES BASICAS PARA AYUDAR A COMPRENDER EL PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS REACTORES NUCLEARES.

SE PRESENTAN EN FORMA ESQUEMATICA LOS SIGUIENTES TEMAS DESARROLLADOS EN EL CURSO:

- 1.- Interacción de neutrones con la materia
- 2.- Mecanismo de la fisión
- 3.- Materiales fisionables
- 4.- Productos de fisión
- 5.- Neutrones instantáneos y retardados
- 6.- Energía producida en la fisión
- 7.- Potencia del reactor, consumo y quemado del combustible
- 8.- Factor de multiplicación y reactividad
- 9.- Combustible - Moderador - Reflector
- 10.- Balance neutrónico y condiciones criticidad
- 11.- Distribución de flujo y potencia
- 12.- Conversión y reproducción
- 13.- Tipos de reactores
- 14.- Dinámica del reactor
- 15.- Variaciones en la reactividad
- 16.- Control del reactor
- 17.- Ciclo de combustible
- 18.- Diseño de blindajes
- 19.- Radiaciones de reactores nucleares
- 20.- Materiales para blindajes

1.- INTERACCION DE NEUTRONES CON LA MATERIA

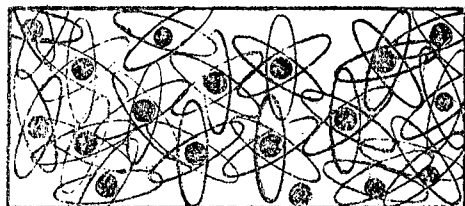
n ————— NO TIENE CARGA ELECTRICA



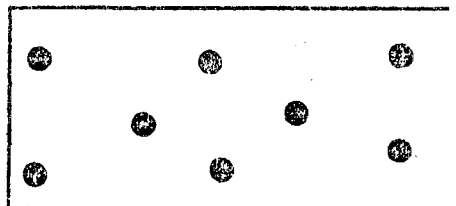
① NO INTERACCIONA CON ELECTRONES

MATERIA VISTA

POR PARTICULAS CARGADAS

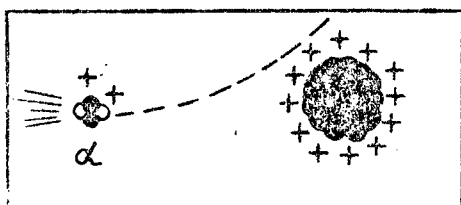


POR NEUTRONES

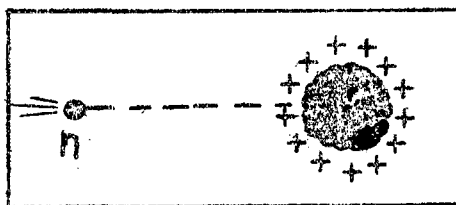


② NO TIENE REPULSION DEL NUCLEO

PARTICULAS CARGADAS



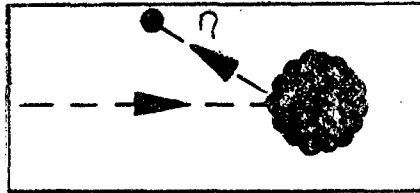
NEUTRONES



INTERACCION DE NEUTRONES CON NUCLEOS

1

DISPERSION



MODERACION
DIFUSION

ELASTICA $\longrightarrow (\eta, \eta)$

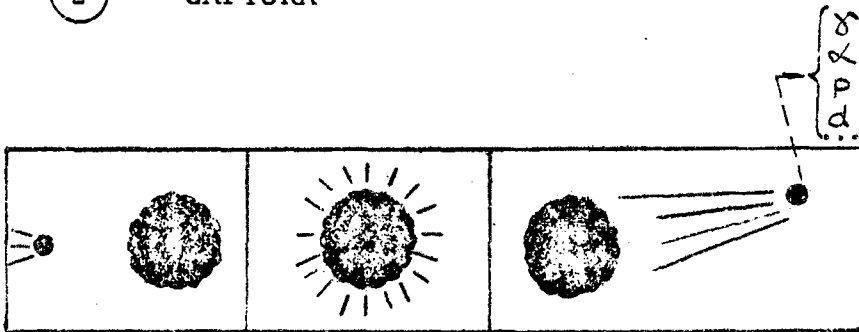
$E_{c\text{ INICIAL}} = E_{c\text{ FINAL}}$

INELASTICA $\longrightarrow (\eta, \eta')$

$E_{c\text{ INICIAL}} \neq E_{c\text{ FINAL}}$

2

CAPTURA



PERDIDA η
FERTIL $\longrightarrow$ FISIL

(η, γ) CAPTURA RADIATIVA

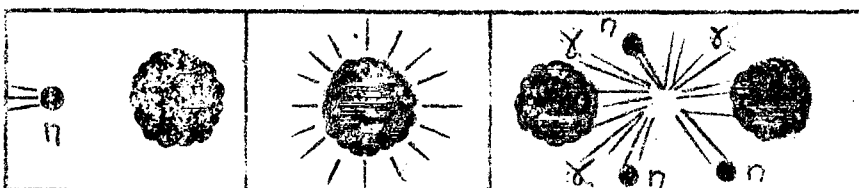
(η, α)

(η, β)

.....

3

FISION (SOLO CON NUCLEOS PESADOS)

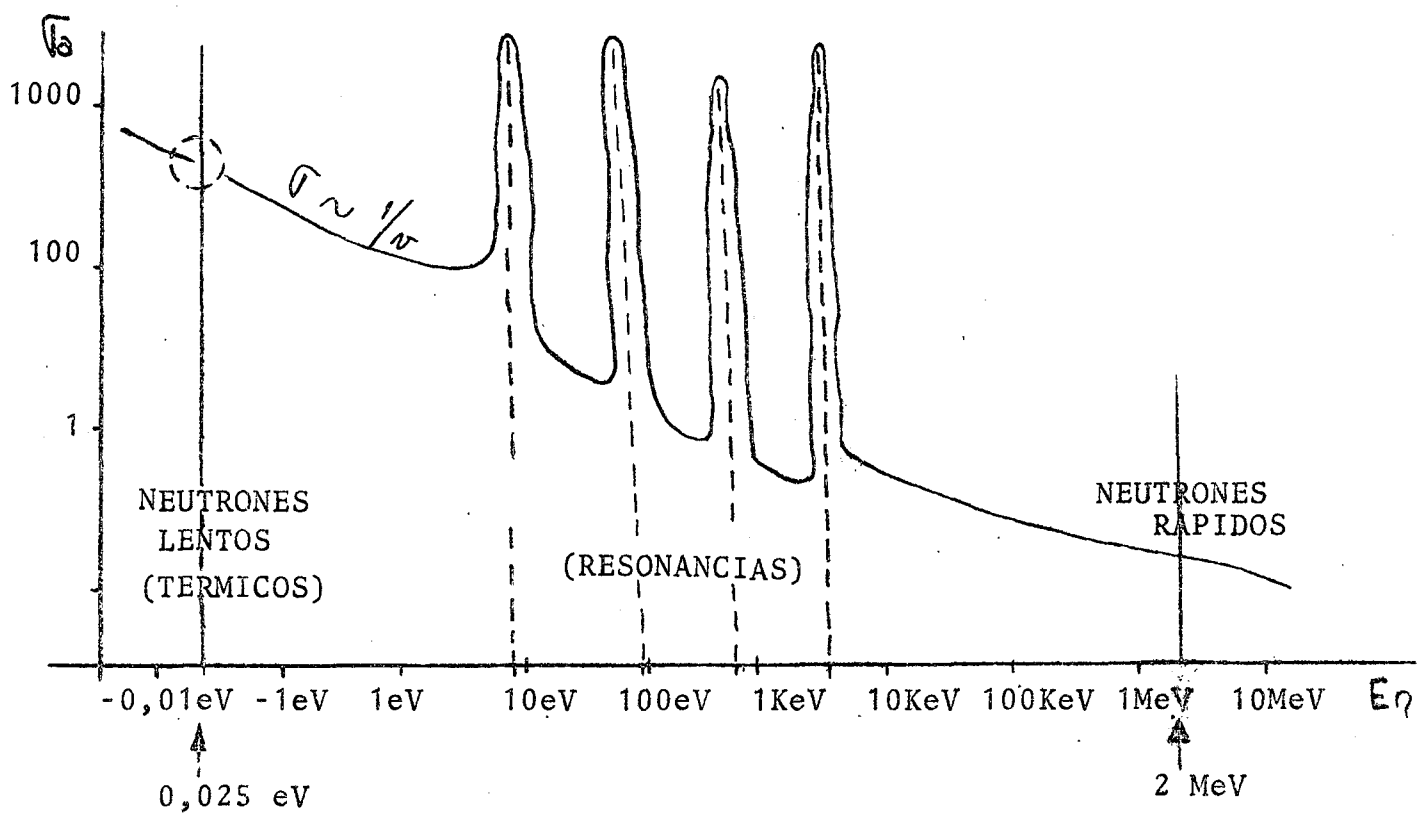


ENERGIA
REACCION EN CADENA

SECCIONES EFICACES PARA REACCIONES CON NEUTRONES

- DISPERSION σ_s
 - CAPTURA σ_c
 - FISION σ_f
- $$\sigma_c + \sigma_f = \sigma_a \text{ (ABSORCION)}$$

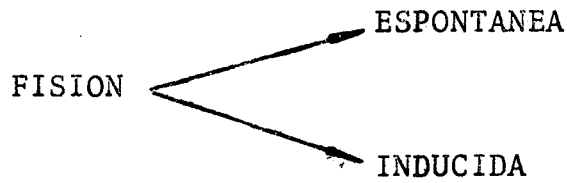
VARIACIONES DE σ_a CON LA ENERGIA DEL NEUTRON



EJEMPLOS DE σ_a (PARA $E_n \simeq 0,025$ eV)

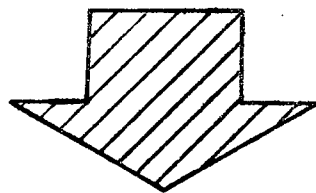
^1H	$\sigma_c = 0,33$ b	
^2H	$\sigma_c = 0,57$ mb	
^{235}U	$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_s = 10 \text{ b} \\ \sigma_f = 580 \text{ b} \\ \sigma_c = 110 \text{ b} \end{array} \right\}$	$\sigma_a = 690 \text{ b}$
^{16}O	$\sigma_a = 0,1$ mb	
^{135}Xe	$\sigma_a = 2,8 \times 10^6$ b	

2.- MECANISMO DE LA FISION



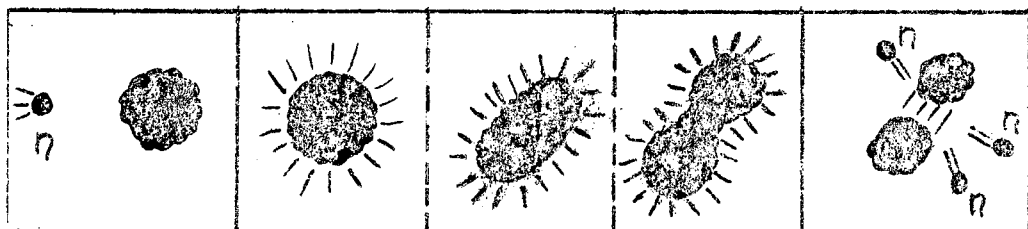
FISION ESPONTANEA DEL URANIO

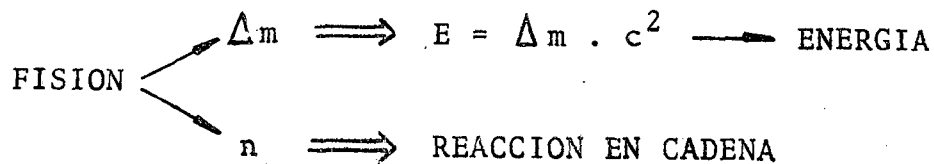
ISOTOPO	$t_{1/2}$ (FISION)
	[AÑOS]
U^{235}	$1,2 \times 10^{17}$
U^{238}	$5,5 \times 10^{15}$



∴ FISION ESPONTANEA ————— NO UTIL PARA PRODUCIR ENERGIA

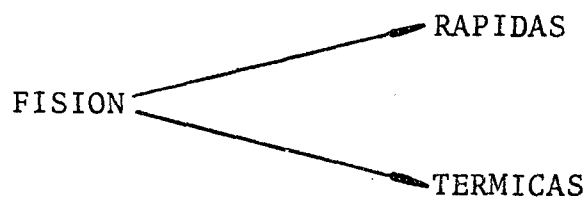
FISION INDUCIDA ————— $E_{th} < E_n < 10 \text{ MeV}$





3.- MATERIALES FISIONABLES

U^{238} U^{235} U^{238}
 Pu^{239} Pu^{241}



U^{233} }
 U^{235} }
 Pu^{239} } FISIONES TERMICAS $\longrightarrow$ FISILES
 Pu^{241} }

U^{238} } FISIONES RAPIDAS $\longrightarrow$ FISIONABLE

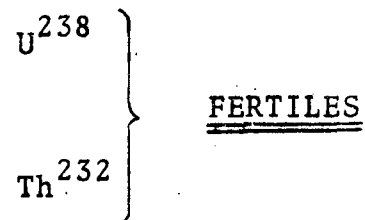
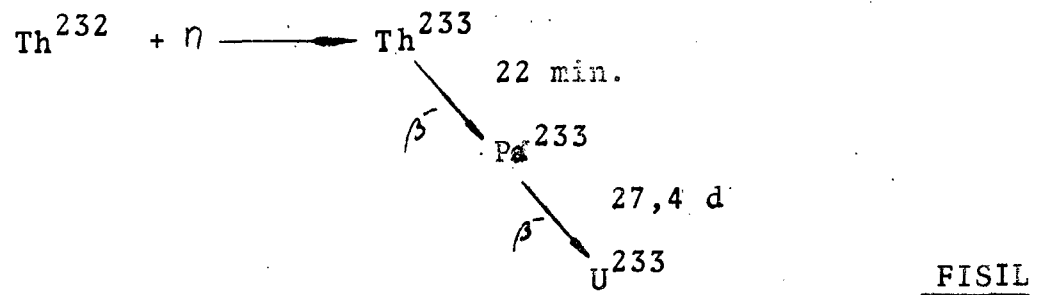
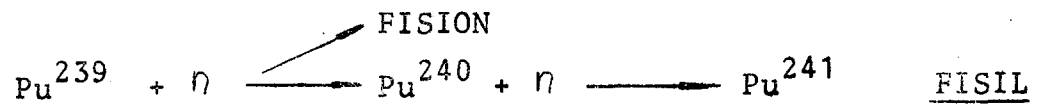
$U_{NAT} \longrightarrow 0,7\% U^{235} + 99,3\% U^{238}$

$U^{238} + n \longrightarrow U^{239} + \gamma$

$\beta^- \longrightarrow$ $t_{1/2} = 23 \text{ min.}$
 Np^{239}

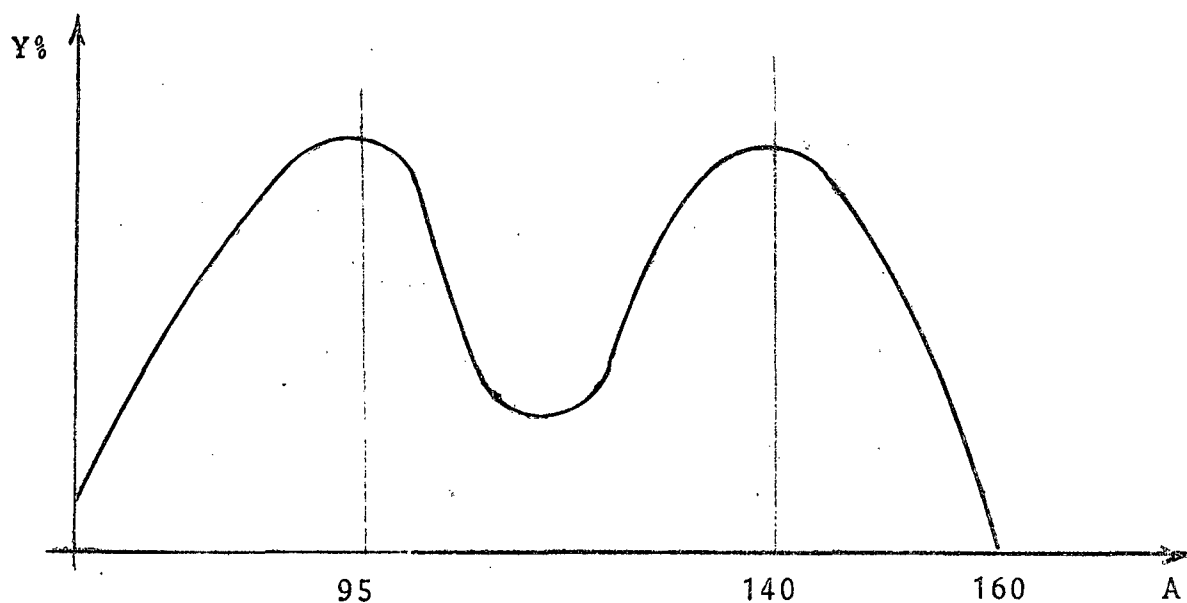
$\beta^- \longrightarrow$ $t_{1/2} = 2,3 \text{ d.}$
 Pu^{239}

FISIL



4.- PRODUCTOS DE FISION

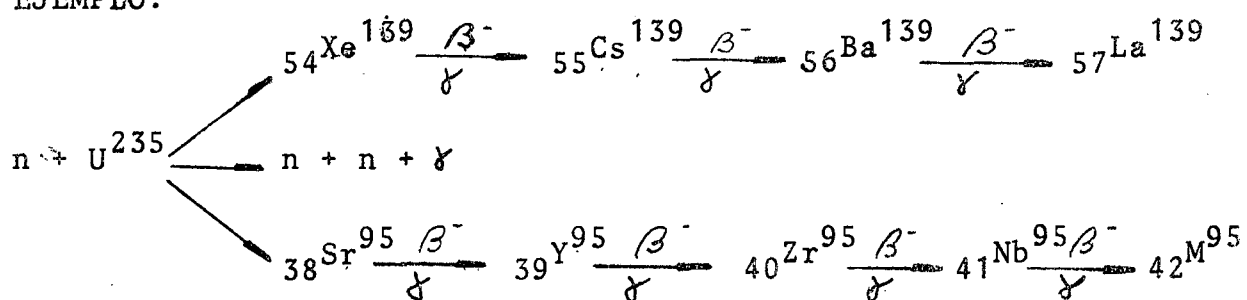
FISION ————— 2 FRAGMENTOS DE FISION



FRAGMENTOS DE FISION ————— $\frac{N}{Z} > \text{ESTABLE}$

⇒ DECAIMIENTO β^- , γ HASTA ESTABILIDAD

EJEMPLO:

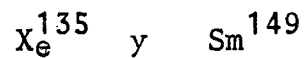


PRODUCTOS DE FISION: TODOS LOS MIEMBROS DE ESTAS CADENAS DE DECAIMIENTO.

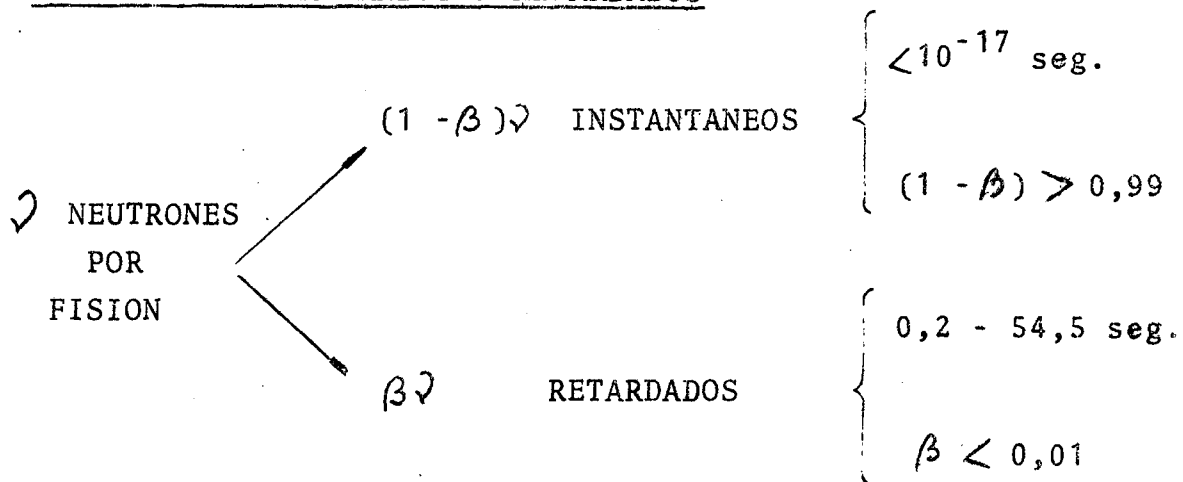
EFFECTOS DE LOS PRODUCTOS DE FISION

- 1.- RADIACION CON $t_{1/2}$ DESDE FRACCION DE SEG. A MILES DE AÑOS $\implies$ NECESIDAD DE CONFINAR COMBUSTIBLES IRRADIADOS: VAINAS
- 2.- EXPOSICION ELEVADA $\implies$ BLINDAJE, OPERACION REMOTA RECAMBIO COMBUSTIBLE, PRECAUCIONES ESPECIALES PARA MANIPULEO Y DEPOSITO COMBUSTIBLES IRRADIADOS.
- 3.- ALGUNOS PRODUCTOS DE FISION SON FUERTES ABSORBENTES DE η $\implies$ VENENOS.

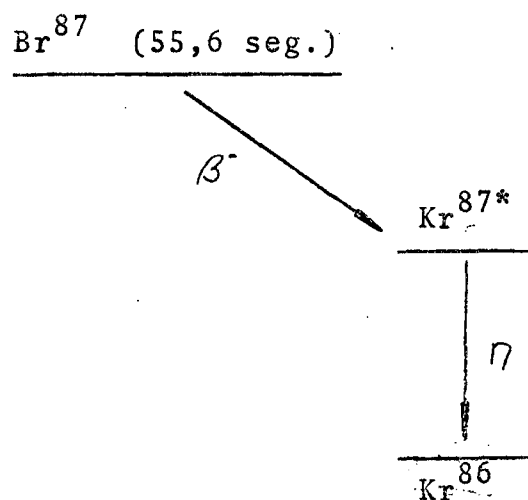
EJEMPLO:



5.- NEUTRONES INSTANTANEOS Y RETARDADOS



EJEMPLO:

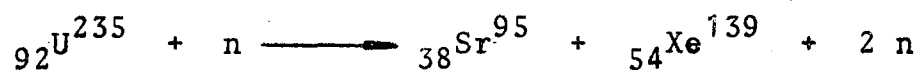


$$\text{U}^{235} \text{ — } \beta = 0,0065 = 0,65 \%$$

$$\text{Pu}^{239} \text{ — } \beta = 0,0021 = 0,21 \%$$

6.- ENERGIA PRODUCIDA EN LA FISION

EJEMPLO (VER 4.):



$$\sum (m_i) = 235,044 + 1,009 = 236,053 \text{ amu}$$

$$\sum (m_f) = 94,903 + 138,918 + 2,018 = 235,839 \text{ amu}$$

$$\Delta_m = 0,214 \text{ amu}$$

$$1 \text{ amu} \hat{=} 931,478 \text{ MeV}$$

$$\therefore \Delta_m \simeq 200 \text{ MeV}$$

DISTRIBUCION APROXIMADA DE LA ENERGIA PRODUCIDA EN LA FISION DE U²³⁵

ENERGIA CINETICA FRAGMENTO FISION LIVIANO	100 MeV
ENERGIA CINETICA FRAGMENTO FISION PESADO	67 MeV
ENERGIA NEUTRONES INSTANTANEOS	5 MeV
ENERGIA γ INSTANTANEOS	6 MeV
ENERGIA DECAIMIENTO β PRODUCTO FISION	7 MeV
ENERGIA DECAIMIENTO γ PRODUCTO FISION	6 MeV
ENERGIA NO RETENIDA EN EL REACTOR (NEUTRINOS)	11 MeV
TOTAL	202 MeV

7.- POTENCIA DEL REACTOR, CONSUMO Y QUEMADO DEL COMBUSTIBLE

$$1 \text{ FISION} \longrightarrow \sim 200 \text{ MeV}$$

$$1 \text{ W} = 6,2 \times 10^{12} \frac{\text{MeV}}{\text{seg}}$$

$$\therefore 1 \text{ W} \Rightarrow 3,1 \times 10^{10} \frac{\text{FISIONES}}{\text{seg.}}$$

$$1 \text{ MW} \Rightarrow 3,1 \times 10^{16} \frac{\text{FISIONES}}{\text{seg.}}$$

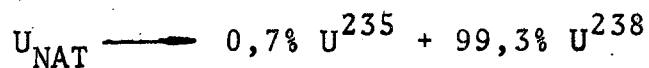
$$\Rightarrow 3,1 \times 10^{16} \frac{\text{ATOMOS } U^{235} \text{ CONSUMIDOS}}{\text{seg.}}$$

$$m (U^{235}) \simeq 235 \text{ amu} = 235 \times 1,66 \times 10^{-24} \text{ gr.}$$

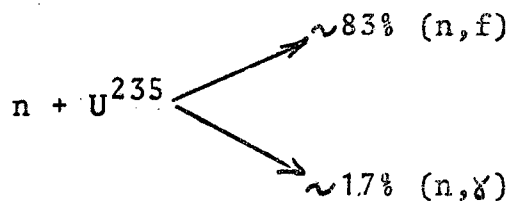
$$= 3,9 \times 10^{-22} \text{ gr.}$$

$$1 \text{ MW} \Rightarrow 3,1 \times 10^{16} \times 3,9 \times 10^{-22} \text{ gr.} = 1,2 \times 10^{-5} \frac{\text{gr. } U^{235}}{\text{seg.}}$$

$$1 \text{ MWd} \Rightarrow 1,2 \times 10^{-5} \times 24 \times 60 \times 60 = 1,0 \frac{\text{gr. } U^{235}}{\text{Día}}$$



$$1 \text{ MWd} \Rightarrow \frac{1,0 \frac{\text{gr. } U^{235}}{\text{DIA}}}{\frac{0,007 \text{ gr. } U^{235}}{\text{gr. } U_{\text{NAT}}}} \approx 140 \text{ gr. } U_{\text{NAT}}$$



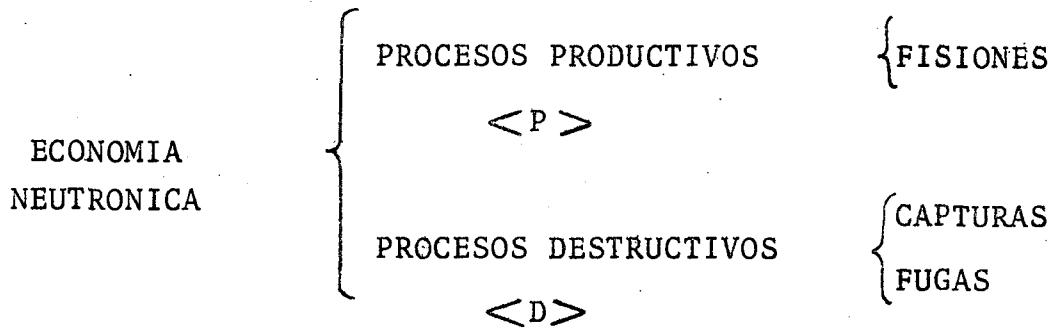
$$1 \text{ MWd} \Rightarrow \frac{140}{0,83} = 170 \frac{\text{gr. } U_{\text{NAT CONSUMIDOS}}}{\text{DIA}}$$

Pu^{239} , Pu^{241} $\longrightarrow$ CONSUMO MENOR

QUEMADO (BURN-UP): CANTIDAD DE MATERIAL FISIL CONSUMIDO
(O ENERGIA PRODUCIDA) AL RETIRAR EL COMBUSTIBLE DEL REACU
TOR

$$\frac{\text{MWd}}{T_u}$$

8.- FACTOR DE MULTIPLICACION Y REACTIVIDAD



FACTOR DE MULTIPLICACION

$$K = \frac{\langle P \rangle}{\langle D \rangle}$$

O TAMBIEN:

$$K = \frac{\text{NUMERO } n \text{ EN UNA DADA GENERACION}}{\text{NUMERO } n \text{ EN LA GENERACION PRECEDENTE}}$$

$K < 1$ ——— REACTOR "SUBCRITICO"

$K = 1$ ——— REACTOR "CRITICO"

$K > 1$ ——— REACTOR "SUPERCRITICO"

REACTIVIDAD: ρ

$$\rho = \frac{K - 1}{K}$$

$$\rho \left\{ \begin{array}{l} < 0 \text{ ————— REACTOR "SUBCRITICO"} \\ = 0 \text{ ————— REACTOR "CRITICO"} \\ > 0 \text{ ————— REACTOR "SUPERCRITICO"} \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{l} K = 1 \\ (\rho = 0) \end{array} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{CORRECTA ELECCION DE MATERIALES} \\ \text{(FISIONES/CAPTURAS)} \\ \\ \text{CORRECTA ELECCION GEOMETRIA Y} \\ \text{TAMAÑO DEL REACTOR (FUGAS)} \end{array} \right.$$

9.- COMBUSTIBLE - MODERADOR - REFLECTOR

ELECCION MATERIAL COMBUSTIBLE ——— DIFICULTAD: COMPETICION ENTRE FISIONES Y CAPTURA

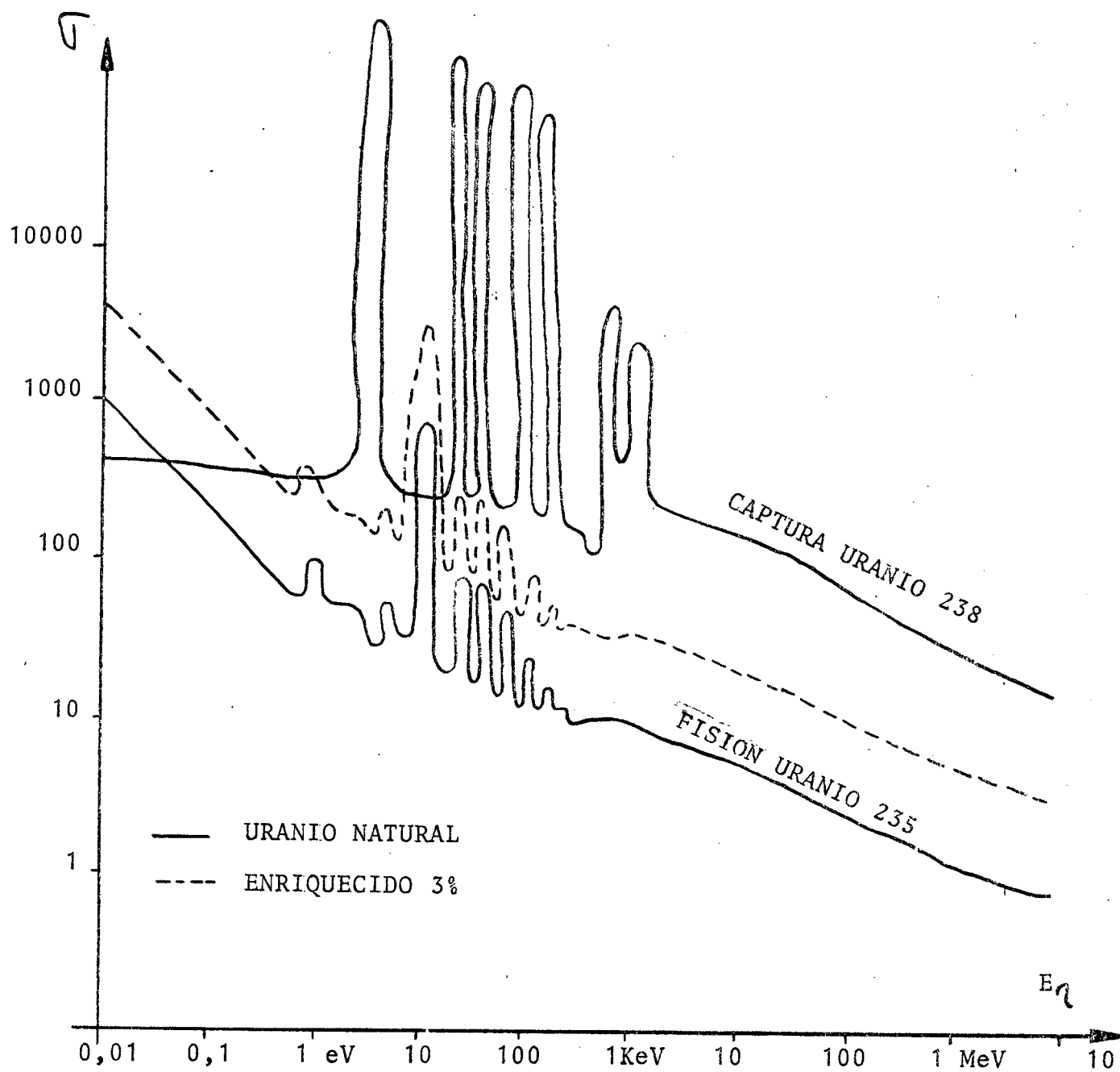
OPCIONES

POSIBLES

- ENRIQUECER EL COMBUSTIBLE

- MODERAR LOS NEUTRONES

- AMBAS MANERAS



COMPARACION DE PROBABILIDADES

FISION U^{235} - CAPTURA U^{238}

COMBUSTIBLE
ENRIQUECIDO

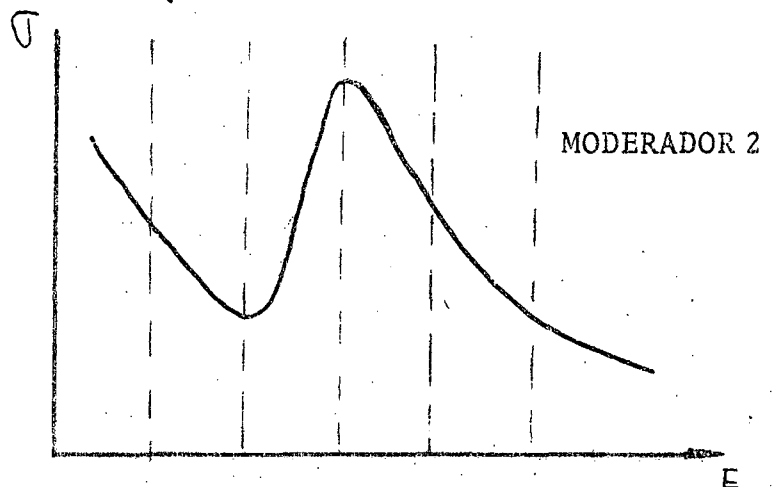
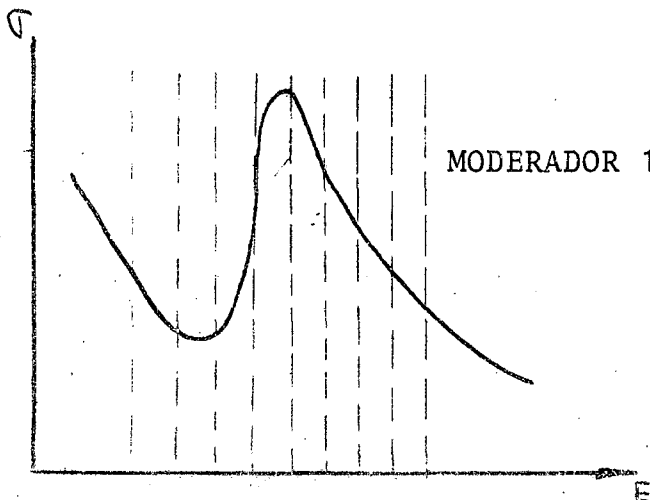
{
DIFICULTOSO
CARO
EVENT DEPENDENCIA PROVEEDOR

COMBUSTIBLE NATURAL $\Rightarrow$ MODERADOR

FUNCION MODERADOR: DEGRADAR (MODERAR) ENERGIA
NEUTRON NACIDO EN LA FISION, HASTA ENERGIA TERMICA SIN
QUE SE PRODUZCA ABSORCION DURANTE EL PROCESO

ABSORCION $\longrightarrow$ {
MODERADOR
COMBUSTIBLE (RESONANCIAS)

MECANISMOS MODERACION { (n,n)



∴ MODERACION EN TAN POCAS COLISIONES COMO SEA
POSIBLE

NUMERO COLISIONES PARA TERMALIZAR $\sim$ A



■ MODERADOR DEBE SER MATERIAL LIVIANO

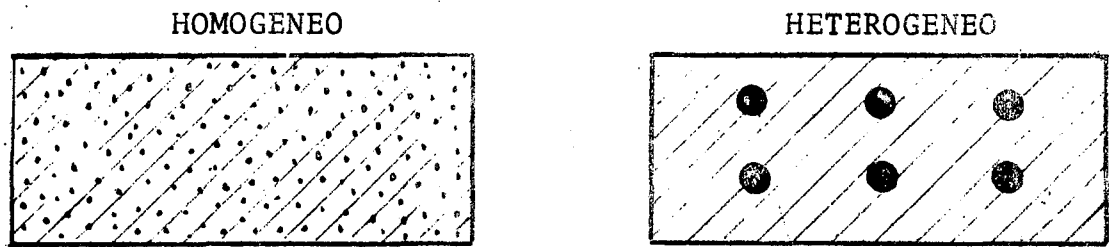
■ COLISIONES DEBEN PRODUCIRSE ————— MATERIAL
DENSO

SELECCION DEL MATERIAL MODERADOR

- LIVIANO (BAJO A)
- MINIMA ABSORCION (σ_a PEQUEÑO)
- ALTA CONCENTRACION

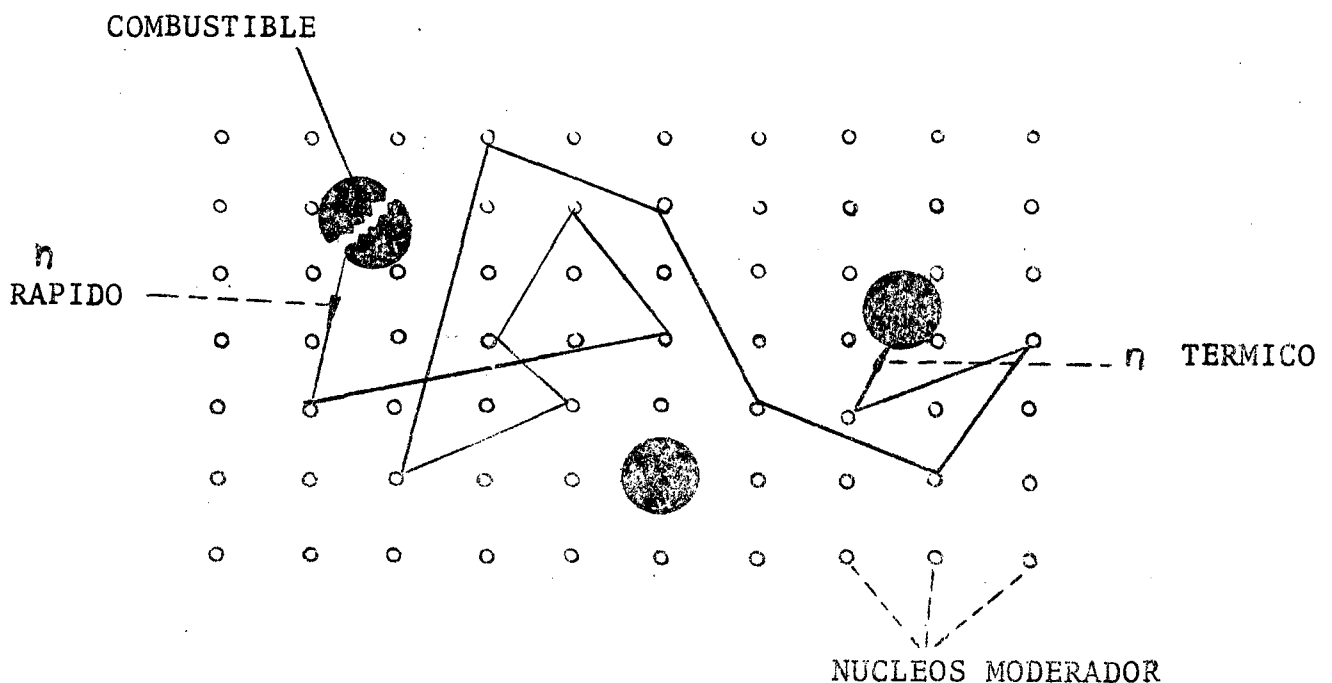
ELEMENTOS	MASA ISOTOPOS	σ_a mb	COMENTARIOS
HIDROGENO	1 - 2	330	AGUA LIVIANA (H ₂ O)
DEUTERIO	2	0,57	AGUA PESADA (D ₂ O)
HELIO	3 - 4	7	GAS
LITIO	6 - 7	71.000	σ_a
BERILIO	9	10	DANOS RADIACION
BORO	10 - 11	755.000	σ_a
CARBONO	12 - 13	3,2	GRAFITO
NITROGENO	14 - 15	1.880	σ_a
OXIGENO	16 - 17 - 18	0,1	DEMASIADO PESADO
FLUOR	19	10	DEMASIADO PESADO

COMO DISPONER AL SISTEMA COMBUSTIBLE MODERADOR?

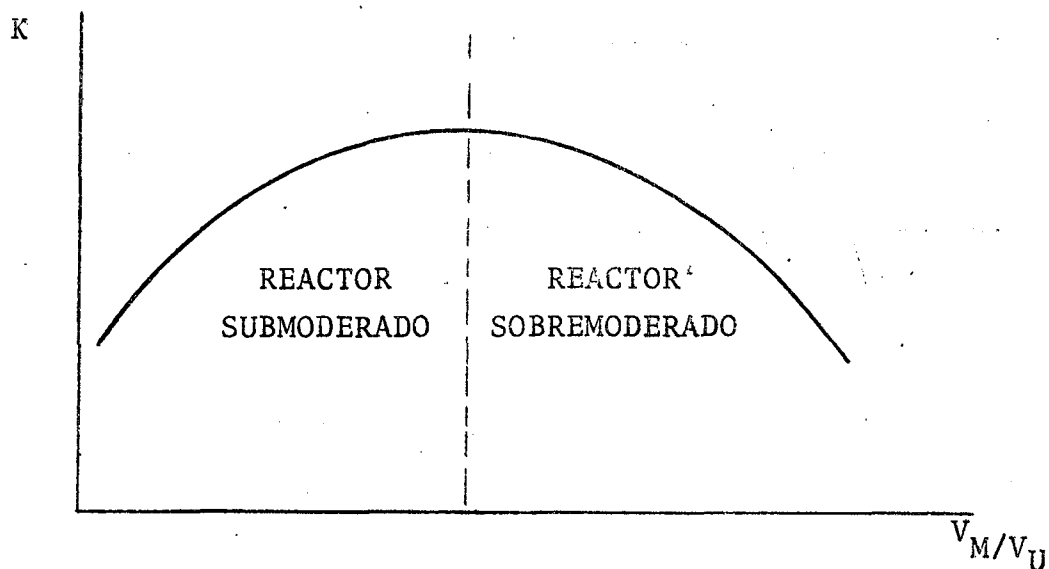


- SOLO POSIBLE CON $U_{ENRIQ.}$
- DIFICULTAD RECARGA
- DIFICULTAD TRANSPORTE CALOR
- CONTAMINACION PRODUCTOS FISION
- CORROSIVIDAD SOLUCIONES URANIO
- PROBLEMAS CRITICIDAD EX-CORE
- PROBLEMAS DINAMICA REACTOR

DISTANCIA ENTRE ELEMENTOS COMBUSTIBLES:



RELACION OPTIMA COMBUSTIBLE - MODERADOR?



M O D E R A D O R	V_M/V_U
GRAFITO	50
AGUA PESADA	30
AGUA LIVIANA	2
[REACTOR RAPIDO]	0

■ PRINCIPALES CONSECUENCIAS DE LA ELECCION DEL MODERADOR

- TAMAÑO DEL REACTOR
- ENRIQUECIMIENTO DEL COMBUSTIBLE
- TIPO DE REFRIGERANTE

■ MODERADOR Y ENRIQUECIMIENTO COMBUSTIBLE

GRAFITO	}	URANIO NATURAL O ENRIQUECIDO
AGUA PESADA		
AGUA LIVIANA	}	REQUIERE URANIO (LIGERAMENTE) ENRIQUECIDO
SIN MODERADOR		
	}	REQUIERE COMBUSTIBLES (U/Pu) $\sim$ 20% ENRIQUECIDO

■ MODERADOR Y TIPO DE REFRIGERANTE

- GRAFITO ($V_M/V_U \sim 50$ para U_{NAT})

—— UN GAS: —— CO_2 ($T < 600^\circ C$)

—— HELIO ($T > 600^\circ C$)

- AGUA LIVIANA ($V_M/V_U \sim 2$)

—— REFRIGERANTE $\equiv$ MODERADOR —— AGUA LIVIANA

- AGUA PESADA ($V_M/V_U \sim 30$)

—— REFRIGERANTE $\neq$ MODERADOR

AGUA PESADA
CO_2
AGUA LIVIANA
HIRVIENTE

- REACTORES RAPIDOS

——— REFRIGERANTE NO LIVIANO

——— METAL LIQUIDO: SODIO

——— HELIO

MATERIALES COMBUSTIBLES

MATERIAL	METALICO U	OXIDO UO ₂	CARBIDE UC
DENSIDAD [gr/cm ³]	18,9	10,9	13,6
TEMPERATURA MAXIMA [°C]	660	2.700	2.500
CONDUCTIVIDAD TERMICA	BUENA	MALA	MEDIA
RESISTENCIA A DAÑOS IRRADIACION	MALA	BUENA	~ BUENA
RESISTENCIA A CORROSION	MALA	BUENA	MEDIA

VAINAS COMBUSTIBLES



PRINCIPALES FUNCIONES

- CONTENER LOS PRODUCTOS DE FISION
- (CON UO_2) PROVEER SOSTEN ESTRUCTURAL AL COMBUSTIBLE
- (CON METAL) PREVENIR CONTACTO COMBUSTIBLE-REFRIGERANTE



PRINCIPALES CUALIDADES REQUERIDAS

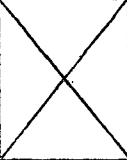
- RESISTENCIA A LA CORROSION POR EL REFRIGERANTE
- BUENA CARACTERÍSTICA DE TRANSFERENCIA TÉRMICA
- SOPORTAR LAS TEMPERATURAS DE OPERACIÓN
- BAJA ABSORCIÓN DE NEUTRONES
- RESISTENCIA A DAÑOS POR RADIACIÓN
- CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS ADECUADAS

PROPIEDADES DE LOS PRINCIPALES MATERIALES

PARA VAINAS

MATERIAL	MAXIMA TEMPERATURA [°C]	σ_a [mb]	COMENTARIOS
ALUMINIO	~ 200	230	Temperatura demasiado baja (útil para reactores investigación tipo piscina)
MAGNESIO	~ 500	60	excelente σ_a , material dúctil
ZIRCONIO	~ 500	180	buena σ_a , excelente resistencia a corrosión en agua (Zircaloy)
BERILIO	~ 700	10	no resiste daños por radiación
ACERO INOXIDABLE	~ 800	~2.500	excelente resistencia a la corrosión, alta temperatura

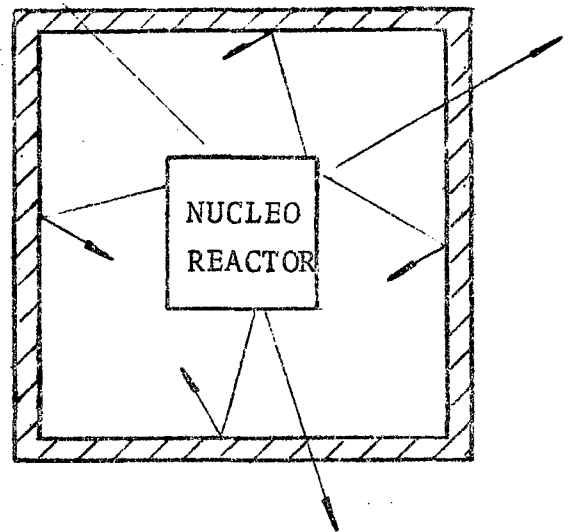
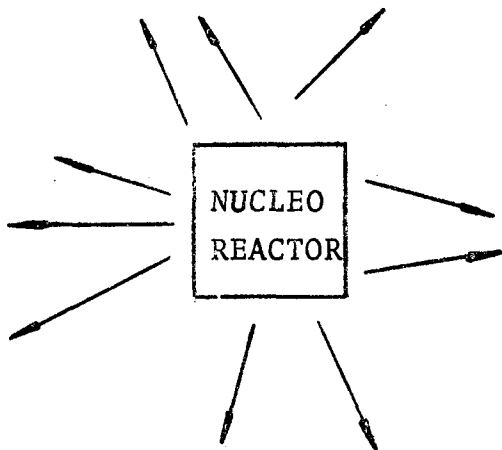
PRINCIPALES TIPOS DE REACTORES

REACTOR	MODERADOR	COMBUSTIBLE			DENSID. POTENC. [KW/l]	REFRIGERANTE			EFICIENCIA [%]
		ENRIQ. U [%]	MATER.	VAINA		MATERIAL	PRESION [at]	T _{SALIDA} [°C]	
MAGNOX	GRAFITO	U _{NAT} (0,7%)	METAL	Mg	1	CO ₂	30	400	~ 31
AGR	GRAFITO	2,2	UO ₂	ACERO INOX.	2	CO ₂	40	650	~ 41
HTR	GRAFITO	5-7	UO ₂ 6 UC ₂		6	He	50	800	~ 39
PHWR	D ₂ O	U _{NAT}	UO ₂	Zr	15	D ₂ O	115	290	~ 31
BWR	H ₂ O	2,5	UO ₂	Zr	50	H ₂ O	70	295	~ 33
PWR	H ₂ O	3,5	UO ₂	Zr	100	H ₂ O	155	320	~ 33
LMFBR		20 min	UO ₂ PuO ₂	ACERO INOX.	650	Na	~ 0	560	~ 42

REFLECTOR

DISMINUCION FUGAS η

- AUMENTANDO TAMAÑO NUCLEO
- AGREGANDO REFLECTOR



PROPIEDADES REFLECTOR $\equiv$ PROPIEDADES MODERADOR

REFLECTOR
REACTORES
TERMICOS

- MASA PEQUEÑA
- ABSORCION MINIMA
- CONCENTRACION ALTA

"REFLECTOR"
REACTORES
RAPIDOS

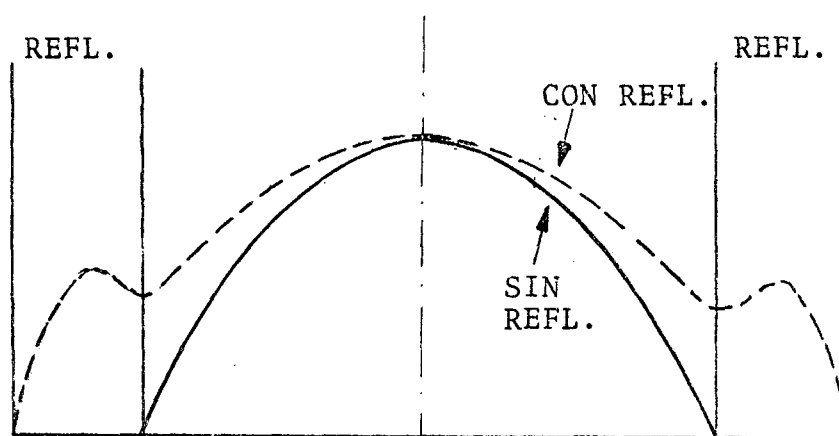
- MATERIAL PESADO $\longrightarrow$ FERTIL ("BLANKET")



EFFECTOS DE AGREGAR REFLECTOR

- APLANAMIENTO DISTRIBUCION POTENCIA

- DISMINUCION TAMAÑO NUCLEO



10.- BALANCE NEUTRONICO Y CONDICIONES CRITICIDAD

REACTOR OPERANDO A POTENCIA CONSTANTE



$$\frac{\text{N}^{\circ} \text{ FISIONES}}{\text{seg.}} = \text{CTE.}$$

$$\therefore \text{N}^{\circ} \text{ NEUTRONES QUE PROVOCAN FISION} = \text{CTE.}$$



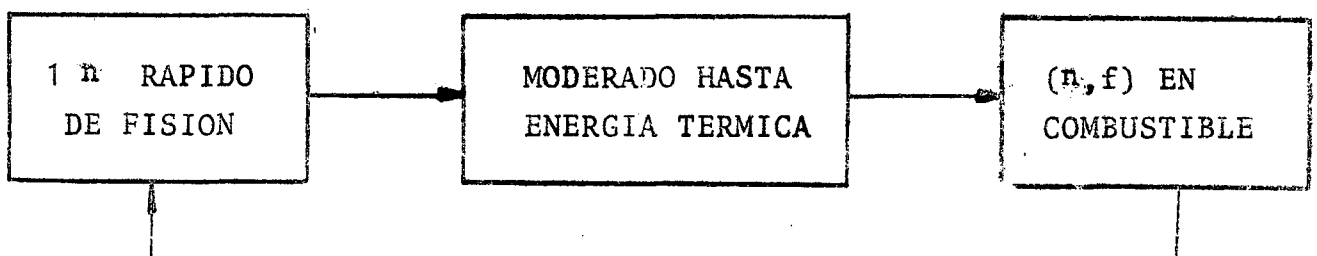
$$K = 1 \longrightarrow \text{REACTOR CRITICO}$$

■ CADA FISION $\longrightarrow \sim 2,5$ n RAPIDOS

3 MANERAS PARA QUE ESTOS n DESAPAREZCAN

- FISIONES
- ABSORCIONES (PARASITAS Y FERTILES)
- FUGAS

REACTOR CRITICO $\implies$ 1 n DE CADA FISION CUMPLE EL CICLO:



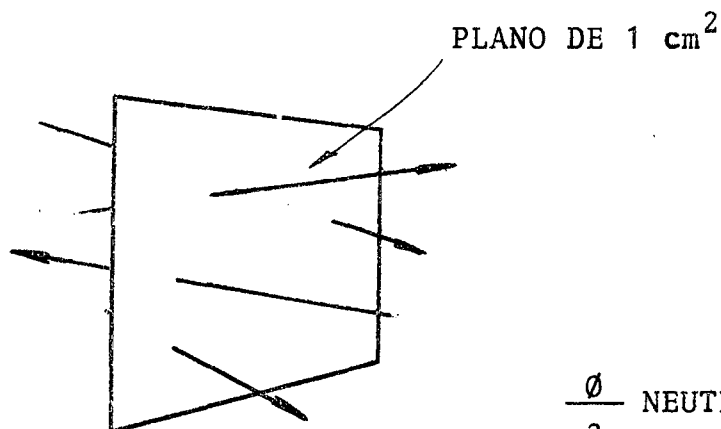
11.- DISTRIBUCION DE FLUJO Y POTENCIA

FACTORES DE FORMA

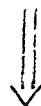
FLUJO NEUTRONICO = DENSIDAD NEUTRONICA x VELOCIDAD

$$\phi = nv$$

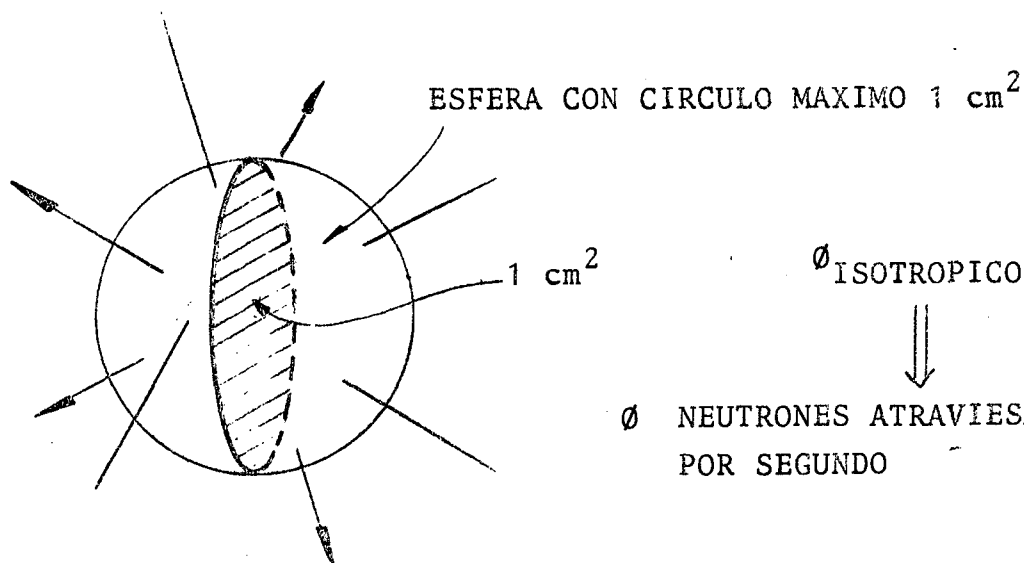
$$[\phi] = \frac{\text{NEUTRONES}}{\text{cm}^2 \cdot \text{seg.}}$$



ϕ ISOTROPICO



$\frac{\phi}{2}$ NEUTRONES ATRAVIESAN EL PLANO
POR SEGUNDO



ϕ ISOTROPICO



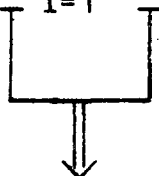
ϕ NEUTRONES ATRAVIESAN LA ESFERA
POR SEGUNDO

FLUJO ———→ DEPENDE {
ENERGIA NEUTRONES
POSICION EN REACTOR
INSTANTE

$$\text{POTENCIA } P \sim \phi \cdot N \cdot \sigma_f$$

$$N = \frac{\text{Nº NUCLEOS FISILES}}{\text{cm}^3}$$

SI EXISTEN VARIOS (j) ELEMENTOS FISILES N_i :

$$P \sim \phi \sum_{i=1}^j (N_i \sigma_f^i)$$


DISTRIBUCION POTENCIA GENERALMENTE DISTINTA DE LA DISTRIBUCION DE FLUJO.

DISTRIBUCION POTENCIA ———→ DEPENDE {
QUEMADO
CARGA COMBUSTIBLE
BARRAS CONTROL
VENENOS
VACIOS

CONDICION MAS SEVERA EN REACTOR

↓
"CANAL CALIENTE"

⇓
FACTORES NUCLEARES DEL CANAL CALIENTE

F_q^N = FACTOR NUCLEAR DE FLUJO CALORICO

$$F_q^N = \frac{\text{FLUJO CALORICO MAXIMO EN REACTOR}}{\text{FLUJO CALORICO MEDIO EN REACTOR}}$$

F_z^N = FACTOR NUCLEAR AXIAL

$$F_z^N = \frac{\text{FLUJO CALORICO MAXIMO EN CANAL CALIENTE}}{\text{FLUJO CALORICO MEDIO EN CANAL CALIENTE}}$$

F_R^N = FACTOR NUCLEAR RADIAL

$$F_R^N = \frac{\text{FLUJO CALORICO MEDIO EN CANAL CALIENTE}}{\text{FLUJO CALORICO MEDIO EN EL REACTOR}}$$

$F_q^N = F_z^N \cdot F_R^N$

INFLUENCIA DE:

- INEXACTITUD DISTRIBUCION POTENCIA
- TOLERANCIA DENSIDAD LOCAL COMBUSTIBLE
- TOLERANCIA DIMENSIONES COMBUSTIBLE
- TOLERANCIA ENRIQUECIMIENTO COMBUSTIBLE
- RECAMBIO COMBUSTIBLE



F_q^T = FACTOR TECNICO DE FLUJO CALORICO

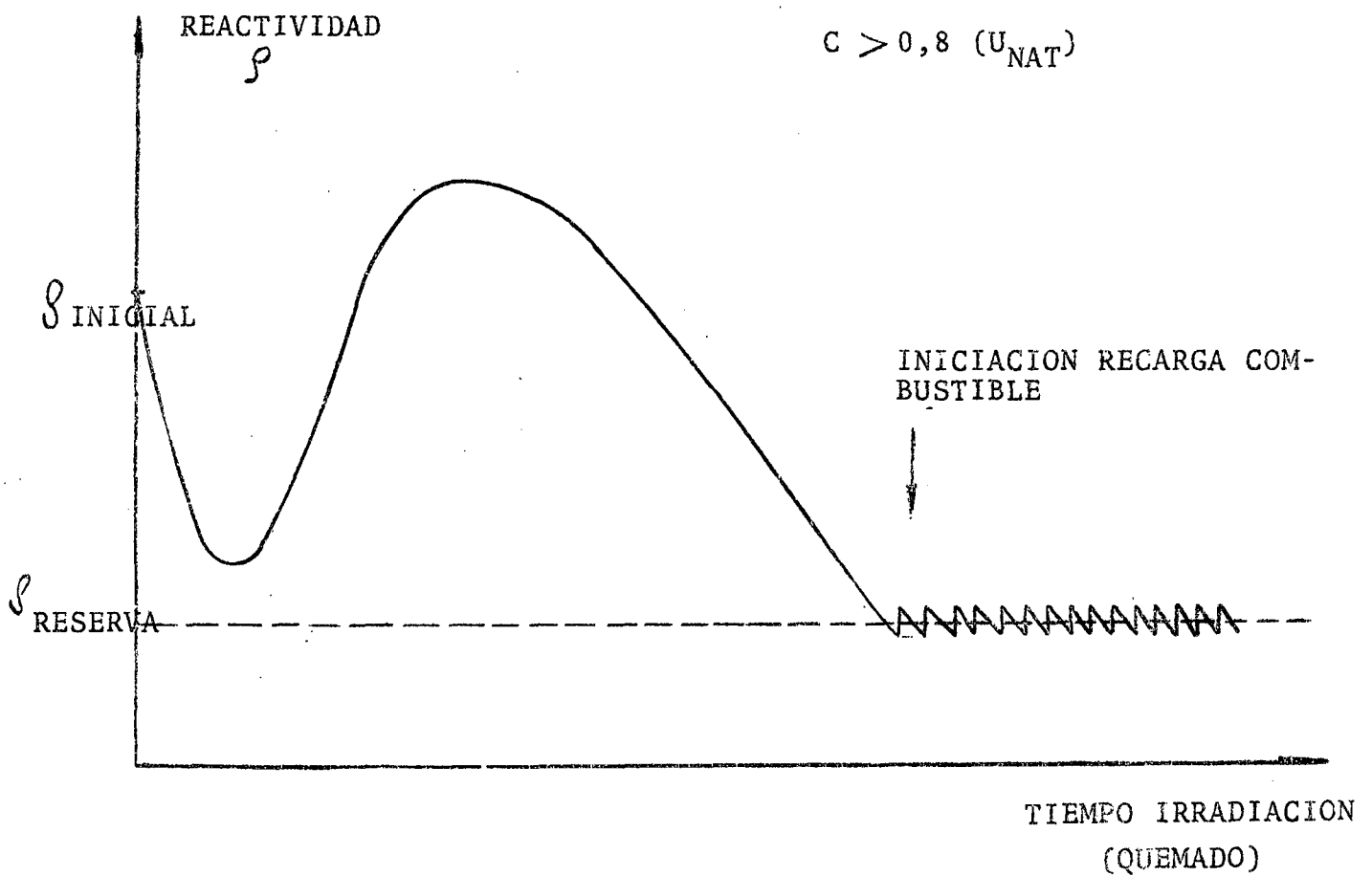
FACTOR TOTAL DE FLUJO CALORICO

$$F_q = F_q^T \times F_q^N$$

12.- CONVERSION Y REPRODUCCION

C = RELACION DE CONVERSION

$$C = \frac{\text{NUMERO NUCLEOS FISILES (Pu}^{239} + \text{Pu}^{241}) \text{ GENERADOS}}{\text{NUMERO NUCLEOS FISILES (U}^{235} + \text{Pu}^{239} + \text{Pu}^{241}) \text{ CONSUMIDOS}}$$



R = RELACION DE REPRODUCCION

$$R = \frac{\text{NUMERO NUCLEOS FISILES (Pu}^{239} \text{ ó U}^{233}\text{) GENERADOS}}{\text{NUMERO NUCLEOS MISMO TIPO (Pu}^{239} \text{ ó U}^{233}\text{) CONSUMIDOS}}$$

G = R - 1 > 0 ————— GANANCIA DE REPRODUCCION

13.- TIPOS DE REACTORES

ENERGIA CINETICA (VELOCIDAD) NEUTRONES QUE PROVOCAN MAYOR

PARTE FISIONES ————— TIPO DE REACTOR

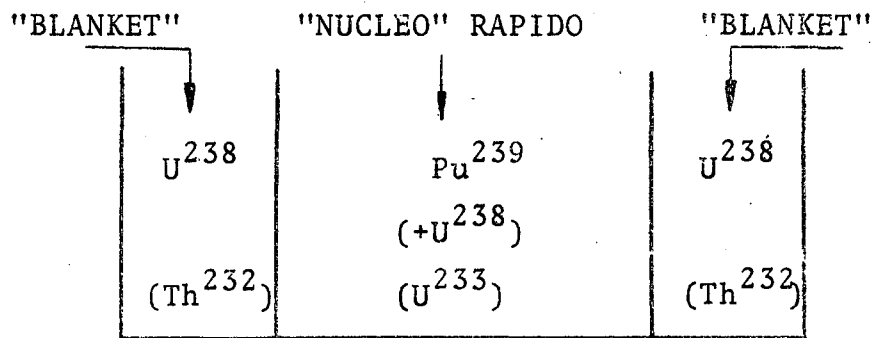
NEUTRONES DE FISION ————— ELEVADA ENERGIA

A) SIN MODERADOR ————— REACTOR RAPIDO

(~ 20% ENRIQ. COMB., ALTA CONCENTRACION

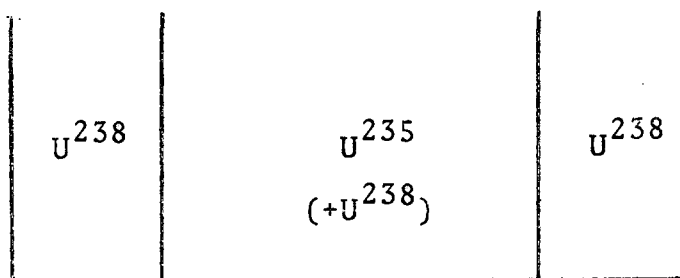
COMB. ————— ALTA DENSIDAD DE POTENCIA

PARA SER ECONOMICOS)



REPRODUCTOR RAPIDO

($R > 1$)



CONVERTIDOR RAPIDO

($C < 1$)

B) CON MODERADOR ——— REACTOR TERMICO
(0,7% — 90% ENRIQUECIMIENTO U^{235})

VENTAJAS REACTORES TERMICOS RESPECTO RAPIDOS:

- MAYOR FLEXIBILIDAD DISEÑO
- POSIBILIDAD ELECCION COMBINACIONES DE MODERADOR/REFRIGERANTE/COMBUSTIBLE
- DISTINTOS TAMAÑOS

(REACTORES RAPIDOS GENERALMENTE PEQUEÑOS ——— DIFICULTAD REFRIGERACION)

CONVERTIDOR TERMICO

(U_{NAT} — Pu^{239})
ENRIQ.

REPRODUCTOR TERMICO

(U^{233} — Th^{232})

14.- DINAMICA DEL REACTOR

EVOLUCION TEMPORAL FLUJO NEUTRONICO:

$$\phi(t) = \phi_0 e^{\frac{t}{T}}$$

$$\therefore P(t) = P_0 \cdot e^{\frac{t}{T}}$$

T = PERIODO DEL REACTOR

$$T > 0 \longrightarrow t = T \implies P(T) = e \cdot P_0$$

$$T < 0 \longrightarrow t = T \implies P(T) = \frac{1}{e} P_0$$

$$T = \frac{l}{\rho}$$

l = TIEMPO ENTRE GENERACIONES DE n

ρ = REACTIVIDAD

$$\rho = 0 \longrightarrow T \rightarrow \infty \implies P(t) = P_0 = \text{cte.}$$

REACTOR CRITICO

$\rho < 0$ $\longrightarrow$ SUBCRITICO $\Longrightarrow$ P decrece

$\rho > 0$ $\longrightarrow$ SUPERCRITICO $\Longrightarrow$ P crece

■ SI NO EXISTIESEN NEUTRONES RETARDADOS ($\beta = 0$)

$$l \sim 0,001 \text{ seg.}$$

EJEMPLO:

$$\Delta \rho = 0,005 \Longrightarrow T = \frac{0,001}{0,005} = 0,2 \text{ seg.}$$

$$\text{EN } \underline{1 \text{ seg.}} \longrightarrow P \approx P_0 \cdot e^{\frac{1}{0,2}} = P_0 \cdot e^5 = 148 \times P_0 !$$

$\therefore$ REGULACION Y PROTECCION DEL REACTOR

NO SERIA POSIBLE

■ EFECTO NEUTRONES RETARDADOS:

$$l \sim 0,1 \text{ seg}$$

EJEMPLO:

$$\Delta \rho = 0,005 \Longrightarrow T = \frac{0,1}{0,005} = 20 \text{ seg.}$$

$$\text{EN } 1 \text{ seg.} \longrightarrow P = P_0 \cdot e^{\frac{1}{20}} = 1,05 P_0$$

$\therefore$ REGULACION Y PROTECCION POSIBLE

■ PERO SI:

$$\Delta \beta \geq \beta$$



NEUTRONES INSTANTANEOS LOGRAN CRITICIDAD
(O SUPERCRITICIDAD)



$$l \sim 0,001 \text{ seg.}$$



CRITICO INSTANTANEO



REACTOR INCONTROLABLE

$$\left| \begin{array}{l} \beta = 0,0065 \text{ — } U^{235} \\ \beta = 0,0021 \text{ — } Pu^{239} \end{array} \right.$$

15.- VARIACIONES EN LA REACTIVIDAD

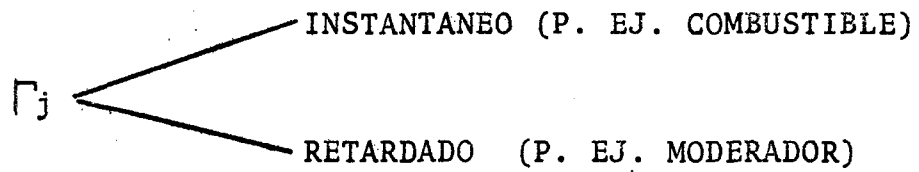
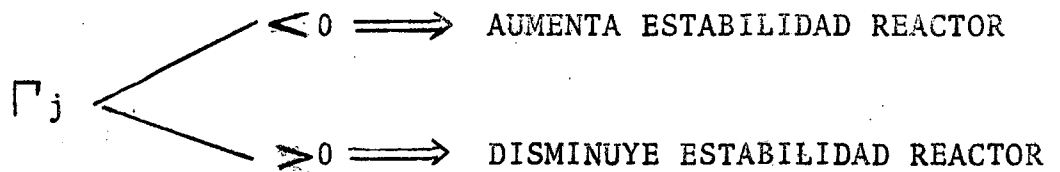
1.- TEMPERATURA

$$\Delta \beta_j = \Gamma_j \cdot \Delta T_j$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \neq \sigma \\ \neq \text{DENSIDAD} \\ \neq \text{GEOMETRIA (VACIO)} \end{array} \right.$$

Γ_j = COEFICIENTE TEMPERATURA COMPONENTE j

j = COMBUSTIBLE, MODERADOR, REFRIGERANTE, ...

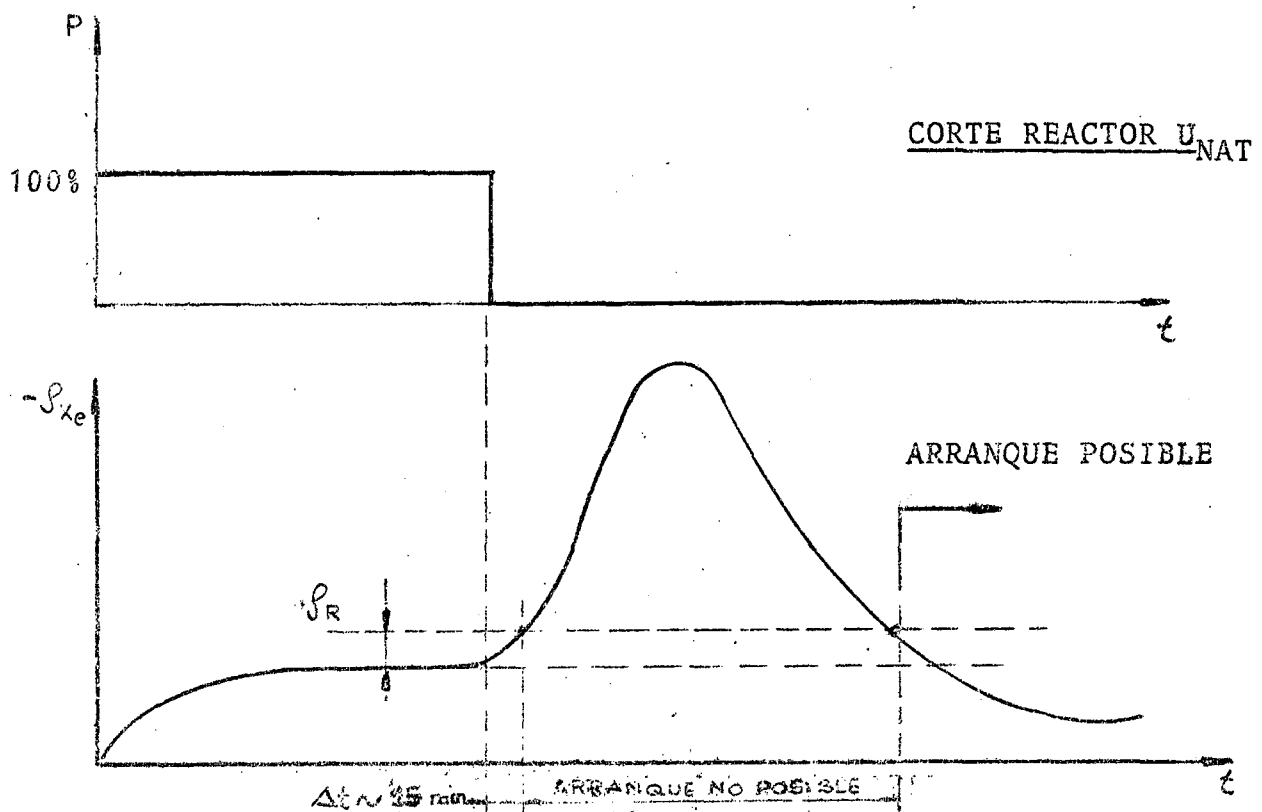
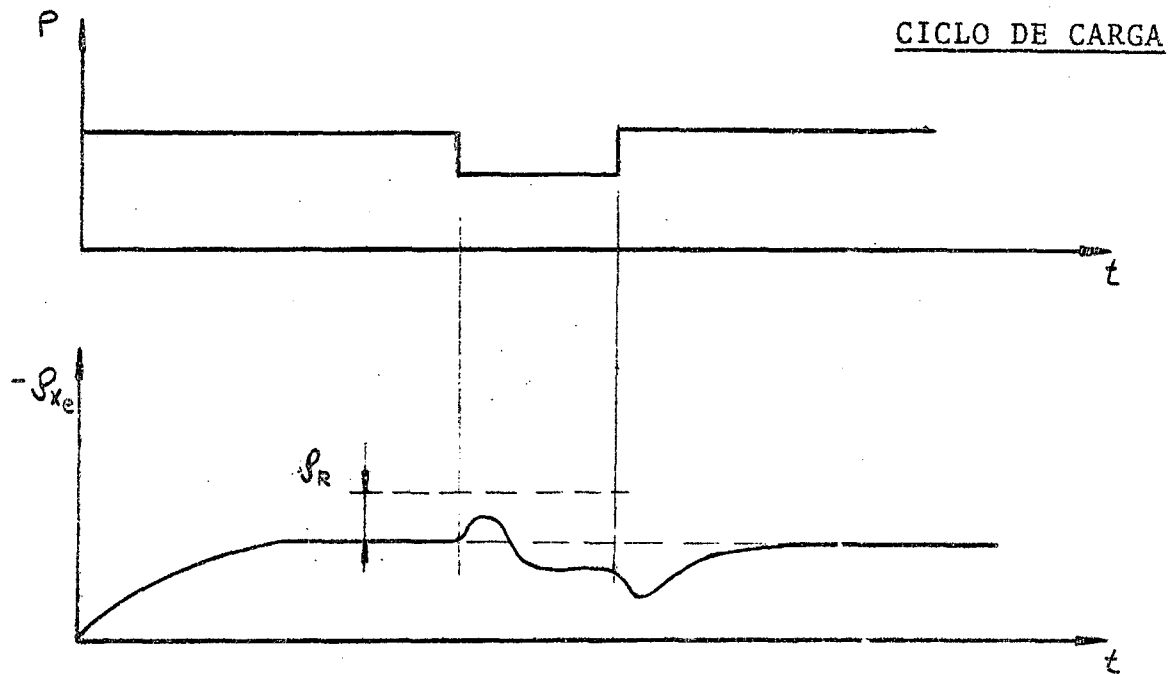


2.- PRODUCTOS FISION

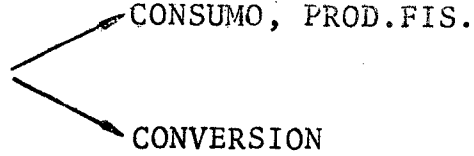
a) Xe^{135} ($\sigma_a = 3,6 \times 10^6 \text{ b}$)

b) Sm^{149} ($\sigma_a = 4,2 \times 10^4 \text{ b}$)

c) OTROS



3.- QUEMADO COMBUSTIBLE

- CAMBIA COMPOSICION COMBUSTIBLE 
 - CONSUMO, PROD.FIS.
 - CONVERSION
- MODIFICA DISTRIBUCION POTENCIA
- ALTERA DINAMICA DEL REACTOR
- REQUIERE PROGRAMA RECAMBIO

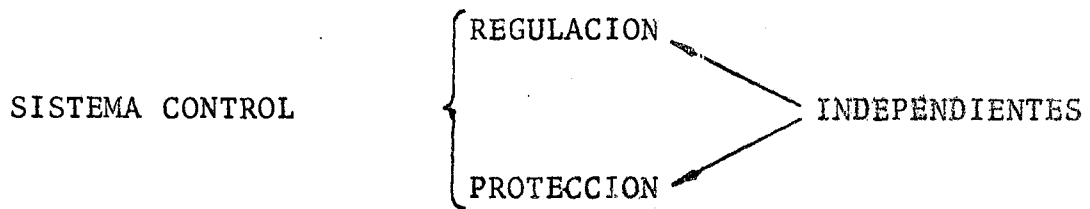
■ VARIACIONES EN LA REACTIVIDAD SE MANIFIESTAN CON DISTINTO RETARDO:

- TEMPERATURA  ~ SEGUNDOS
- PRODUCTOS FISION  ~ MINUTOS/HORAS
- QUEMADO COMBUSTIBLE  ~ SEMANAS

16.- CONTROL DEL REACTOR

■ REQUERIMIENTOS:

- a) MANTENER $\rho = 0$ DURANTE OPERACION ESTACIONARIA
- b) PERMITIR $\Delta\rho$ PEQUEÑOS PARA VARIAR CARGA
- c) PROVEER RAPIDAMENTE $\Delta\rho$ GRANDE EN EMERGENCIA



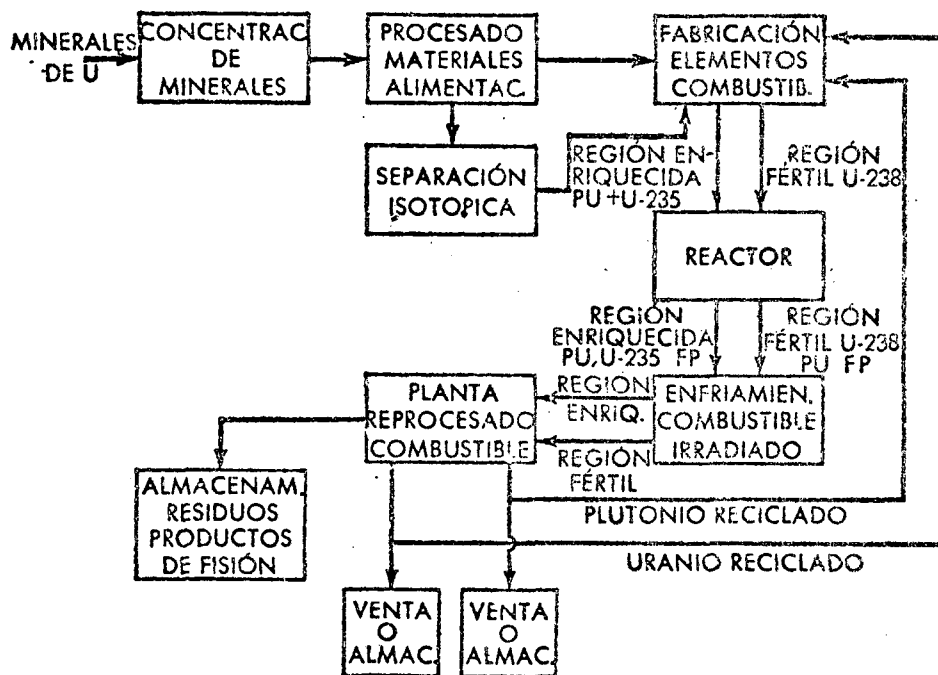
METODOS DE CONTROL

- 1.- ABSORCION
-
- ```
graph LR; A[1.- ABSORCION] --> B[BARRAS DE CONTROL (ρ CORTE)]; A --> C[VENENOS];
```

- 2.- COMBUSTIBLE

- 3.- FUGAS
- 
- ```
graph LR; A[3.- FUGAS] --> B[NIVEL MODERADOR]; A --> C[ESPESOR REFLECTOR];
```

17.- CICLO DE COMBUSTIBLE



18.- DISEÑO DE BLINDAJES

SE DEBEN CONSIDERAR:

- a) - MODERACION DE LOS NEUTRONES RAPIDOS
- b) - CAPTURA DE LOS NEUTRONES MODERADOS
- c) - FUENTE DE RADIACION GAMMA SECUNDARIA
- d) - ATENUACION DE TODA LA RADIACION GAMMA
- e) - DETERMINACION DE LA ENERGIA TOTAL DEPOSITADA EN EL BLINDAJE.

-MODERACION $\longrightarrow$ A PEQUEÑO $\longrightarrow$ H EN FORMA DE H_2O PARA
ENERGIA INTERMEDIAS

-ENERGIAS ALTAS $\longrightarrow$ A MEDIANO O GRANDE PARA PROCESOS (n,n')
 $\longrightarrow$ Pb, Zr

... COMBINACION ELEMENTOS LIVIANOS Y PESADOS



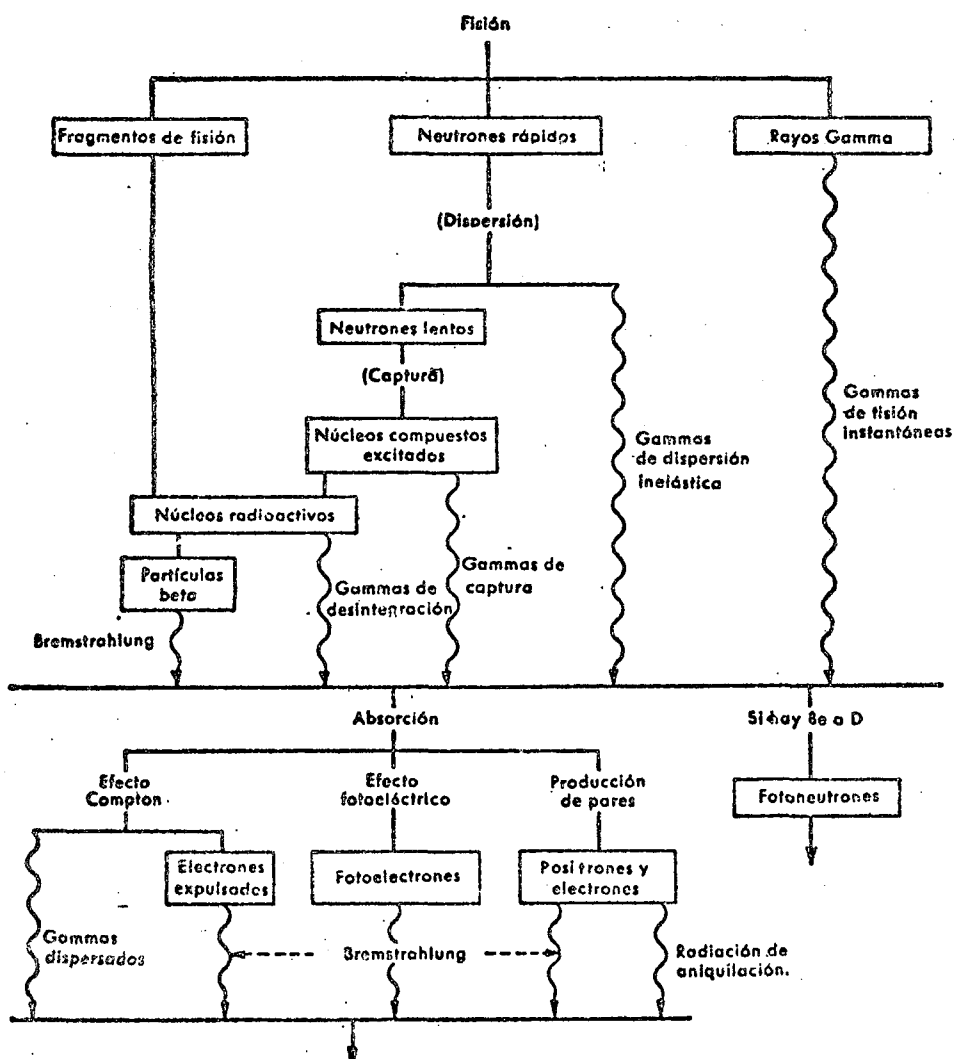
TAMBIEN ATENUA RADIACION GAMMA SI ESPESOR ADECUADO

-BLINDAJE TERMICO (O BIOLOGICO) PARA PROTEGER BLINDAJE RADIACION:

- METAL PESADO
- BUENA CONDUCTIVIDAD TERMICA
- TEMPERATURA FUSIÓN ELEVADA

POR EJEMPLO: HIERRO

19.- RADIACIONES DE REACTORES NUCLEARES



20.- MATERIALES PARA BLINDAJES

1. PESADOS O MEDIANAMENTE PESADOS PARA ATENUAR
Y MODERAR n RAPIDOS HASTA ~ 1 MeV MEDIANTE
REACCION (n, n')
2. HIDROGENADOS PARA MODERAR n DE $\lesssim 1$ MeV
MEDIANTE REACCION (n, n)
3. ABSORBENTES DE n SIN PRODUCCION γ ALTA ENERGIA

MATERIALES MAS UTILIZADOS:

- HIERRO
- PLOMO (SI TEMPERATURA NO ELEVADA)
- AGUA
- HORMIGON
- BORÓ