

04.77.03

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº	AÑO
1	1977

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

CALCULOS DE EFECTOS TERMICOS LOCALES QUE PRODUCEN PARTICULAS
DE PuO_2 EN BARRAS COMBUSTIBLES NUCLEARES DE UO_2

Por

G.SANCHEZ SARMIENTO *)
FERNANDO G.BASOMBRIO *)
y ADOLFO MARAJOFISKY **)

*) Centro Atómico Bariloche, C.N.E.A.
Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo.
8400, San Carlos de Bariloche, Río Negro.

**) Gerencia de Desarrollo, C.N.E.A.
Centro Atómico Constituyentes, Buenos Aires
ARGENTINA

San Carlos de Bariloche
Noviembre de 1977

RESUMEN

Se ha realizado un estudio de las sobreelevaciones locales de temperatura que producen, dentro de barras combustibles tipo MZFR con Pu, y tipo Central Nuclear de Atucha con Pu, la presencia de pequeñas partículas (islas) de óxido de plutonio en el interior de las pastillas de óxido de uranio. Mediante el Código AXICUARM, desarrollado en el Centro Atómico Bariloche (que emplea el método de elementos finitos para cualquier geometría con simetría de revolución), se resolvió al efecto la ecuación no lineal de conducción de calor (con conductividades dependientes de la temperatura) para varias posiciones y diferentes tamaños de las partículas dentro de la barra.

A. INTRODUCCION

En la próxima década, el reciclado de plutonio en reactores térmicos moderados con agua pesada se presenta como económicamente promisorio. Dados los lineamientos del Plan Nuclear Argentino, este tipo de ciclo resulta una vía natural de desarrollo.

En este contexto se encuadran los planes de la Gerencia de Desarrollo en cuanto:

- a) La adquisición de la tecnología de fabricación de elementos combustibles con plutonio.
- b) Los estudios de comportamiento y performance de los mismos para lograr un diseño económico y confiable.

Una tarea que reúne ambos aspectos es la fabricación de un prototipo, en particular el llamado "MZFR-Pu", a ser irradiado en el reactor MZFR de Karlsruhe (Alemania).

Si bien el laboratorio ya ha irradiado prototipos en este reactor, las diferencias principales entre el MZFR-Pu y aquéllos serían:

- i) el de alcanzar un mayor quemado (15.000Mwd/Tn)
- ii) el de estar enriquecido con plutonio (1.27% total).

Estos puntos hacen necesaria una revisión crítica de las especificaciones de este prototipo:

- i) Cálculos realizados en la División Prototipos de dicha Gerencia muestran que para el quemado previsto, las deformaciones acumuladas en la vaina nosuperan los límites de confianza.
- ii) El plutonio se encuentra como PuO_2 en la pastilla de UO_2 y forma solución sólida con este último en un amplio rango de concentraciones y en las temperaturas de trabajo del elemento combustible. Las propiedades físicas relevantes, en cuanto al comportamiento del mismo, son semejantes en el óxido mixto a las del UO_2 (conductividad térmica, punto de fusión, propiedades mecánicas, etc), especialmente en las bajas concentraciones en que será utilizado.

La solución homogénea puede obtenerse por vía húmeda - por ejemplo a partir de la coprecipitación de los nitratos correspon

dientes - pero esta vía resulta menos económica que la del mezclado mecánico de los óxidos, pues deben agregarse etapas de procesamiento en cajas de guantes. El segundo procedimiento, debido a que los bajos coeficientes de difusión catiónica no permiten la homogeneización de la mezcla en las temperaturas y tiempos normalmente utilizados, presenta a su vez problemas:

- a) De fabricación: lograr un mezclado y la sinterización que aseguren la densidad requerida y continuidad en las interfases PuO_2 - UO_2 .
- b) De comportamiento: las islas de la fase PuO_2 en la matriz de UO_2 pueden provocar (debido fundamentalmente a su diferencia en la sección eficaz de fisión):
 - b.1) Efectos de autoblindaje;
 - b.2) Efectos adversos en el Coeficiente Doppler en transitorios;
 - b.3) Puntos de sobrecalentamiento de la matriz.

Resulta entonces de importancia para la especificación del tamaño permisible de las islas, un estudio detallado de los efectos que provocan las mismas. En particular, el punto b.3) es el más importante y su análisis cuantitativo es el objeto del presente trabajo:

Para un cierto nivel de potencia disipada en la barra combustible por la fisión nuclear en ambos materiales, se ha calculado la distribución espacial de la temperatura y del flujo calórico en las islas de PuO_2 y en su radio de influencia térmica, en función de su tamaño, para diversas ubicaciones de ella dentro de la barra.

Por ser el problema también de interés para las barras combustibles de la Central Nuclear de Atucha (C.N.A) con plutonio se ha hecho extensivo el estudio a esta última.

Los valores obtenidos de la temperatura deberán confrontarse a posteriori con las tolerancias permitidas por los criterios de diseño en las zonas críticas:

- a) en el centro de la pastilla para evitar la fusión;
- b) en la vaina para evitar alteración de las propiedades mecánicas y aceleración de la susceptibilidad a la corrosión.

Con el menor de los diámetros correspondientes a los puntos a) y b) se calcula la probabilidad de que dos islas se encuentren contiguas, y si este valor se encuentra por debajo de los límites de confianza permitidos, se lo elige como valor de especificación del tamaño de isla.

En esencia se trata de un problema tridimensional de distribución de temperatura, pero si la partícula se encuentra sobre el eje de la barra (zona A de la figura 1), la geometría tiene simetría de revolución y sus puntos pueden especificarse con sólo dos coordenadas. Además otras de las situaciones más importantes de considerar son aquéllas en que la partícula está adyacente o muy próxima a la vaina. Como los tamaños que interesan de la partícula (entre 50 y 400 micrones) son muy pequeños respecto de las dimensiones de la barra, es válido resolver el problema para estas últimas situaciones tomando una pequeña porción de la barra cercana a la vaina (zona B de la figura 1) y aproximando la geometría real por una aproximada de simetría axial, con el eje de revolución perpendicular a la vaina.

Se ve entonces que un análisis tridimensional completo para posiciones arbitrarias de la partícula no agregaría una información adicional esencial a la obtenida mediante los análisis bidimensionales planteados. Se realizaron entonces cálculos del carácter mencionado con un código preelaborado en el Centro Atómico Bariloche, llamado AXICUARM /2/, que por el método de elementos finitos resuelve la ecuación de calor estacionaria no lineal en coordenadas cilíndricas para geometrías con simetría axial:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[K(\vec{r}, T) \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\vec{r}, T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \frac{K(\vec{r}, T)}{r} \cdot T + \rho(\vec{r}) = 0 \quad (1)$$

donde $\vec{r}=(r,z)$ es la coordenada vectorial de cada punto; $T(\vec{r})$ la temperatura (incógnita a determinar); $K(\vec{r},T)$ la conductividad térmica dependiente del material y de la temperatura; y $\rho(\vec{r})$ la generación de calor por unidad de volumen.

En la Sección B. se describen los cálculos realizados; en C. los datos empleados en cada uno de ellos; en D. los resultados; y en E. algunas observaciones y conclusiones. En el Apéndice I se calculan las respectivas generaciones de calor en cada material.

B.- CALCULOS REALIZADOS

Con cuatro diámetros distintos de partículas de PuO_2 (50, 100, 200 y 400 micrones) y generaciones de calor en el UO_2 y en el PuO_2 (cuya relación entre ellas para un quemado hipotético están calculadas en el Apéndice I), que corresponderían a un dado nivel de potencia por unidad de longitud de la barra si no estuviese la partícula, se resolvió la ecuación (1) para las cuatro siguientes ubicaciones de ésta dentro de la barra:

a) La partícula es esférica y está ubicada sobre el eje de simetría de la barra combustible. Se considera una cierta porción L de la longitud de ésta (zona A de la figura 1), con la partícula en su punto medio, aplicando condiciones de contorno de flujo calórico nulo en ambas superficies extremas a y b , y de temperatura fija T_e (del refrigerante) sobre su superficie lateral c . Por simetría se toma solamente el recinto de cálculo rayado en la figura.

b) La partícula es esférica y yace sobre la superficie exterior de la pastilla, sin afectar el espacio gaseoso entre ésta y la vaina. Se considera la zona B. de la figura 1, aproximando su forma a la de un cilindro con su eje de simetría perpendicular a la vaina, con condiciones de contorno de temperatura fija sobre los lados a' y c' , y de flujo calórico nulo sobre su superficie lateral b' . La temperatura sobre a' se determinó previa-

mente calculando en el recinto de la zona A, sin la presencia de la partícula, la temperatura en $r=R_a$. A su vez, la temperatura sobre c' será obviamente la temperatura T_e del refrigerante.

c) La situación es análoga a la b), con la diferencia en que la partícula no es esférica y presenta una superficie máxima en contacto con la vaina, sin afectar la resistencia térmica del espacio gaseoso.

d) La partícula es esférica y está centrada a 4.7 mm del eje de la barra en el caso MZFR - Pu, ó a 4.8 mm del eje para la barra C.N.A. con Pu. Se considera la zona B con las mismas condiciones de contorno de b).

Los cálculos descriptos en a) fueron realizados con la red de elementos finitos triangulares de la figura 2, y los descriptos en b), c) y d) con la de la figura 3. Ambas redes, que corresponden a las partes rayadas de las zonas A y B respectivamente de la figura 1, fueron generadas automáticamente mediante sendos programas. En las figuras se indican las condiciones de contorno impuestas. Para incorporar con distintos diámetros las partículas de PuO_2 se hizo necesario deformar localmente dichas redes. En la figura 4 se muestran las distintas conformaciones de la red de la zona B para las situaciones b) y d), y en la figura 5 las que corresponden a la situación c). Las dimensiones de los poliedros axisimétricos que éstos configuran se eligieron de manera tal que sus volúmenes fuesen iguales a los de las respectivas esferas que ellos representan para las situaciones a), b) y d). En cambio, para la situación c), los elementos simulan exactamente a la geometría de la partícula que se quiere representar.

C. - DATOS DE CALCULO

Se dan a continuación todos los datos físicos y geométricos con los que se realizaron los cálculos para ambos tipos de barras combustibles:

Magnitud	Unidad	Barra MZFR - Pu	Barra C.N.A. - Pu
<u>C. 1. - Datos Físicos:</u>			
Conductividad del Zry-4 dependiente de la temperatura /6/.	w/cm. °C	$K_{\text{zry-4}} = 0.1145 + 1.425 \times 10^{-4} T$ (T en °C)	
Conductividad del UO ₂ dependiente de la temperatura /6/.	w/cm. °C	$K_{\text{UO}_2} = \frac{1}{B+C (T+273)} + D (T+273)^3$ B=3.3674; C=0.0262; D= 0.478 x 10 ⁻¹² (T en °C).	
Conductancia del espacio pastilla - vaina (λ) /6/.	w/cm ² . °C	1.475	1.375
Conductividad correspondiente del esp. past. - vaina para el esp. ficticio supuesto (K _{int}).	w/cm. °C	1.475 x 10 ⁻³	1.237 x 10 ⁻²
Conductividad del PuO ₂ (K _{pu02}).	w/cm. °C	$K_{\text{PuO}_2} = K_{\text{UO}_2}$	
Potencia disipada en las pastillas por unidad long. barra.	w/cm	616.	687.
Generación de calor en el UO ₂ por unidad de volumen. (Q ₂).	w/cm ³	728.	775.
Generación de calor en el PuO ₂ por un. de vol. (Q ₁). ver Ap.	w/cm ³	9.90 x 10 ⁴	10.55 x 10 ⁴
Temperatura ext. T _e del refr.	°C	305.	324.
<u>C. 2.-Datos Geométricos.</u>			
Radio exterior R _e de la vaina.	mm	5.74	5.95
Radio interior R _i de la vaina.	mm	5.20	5.40
Radio de la pastilla UO ₂ .	mm	5.19	5.31
Espesor ficticio del espacio pastilla - vaina considerado.	mm	0.01	0.09
Altura recinto zona B (R _e -R _a).	mm	2.04	2.15
Radio del recinto zona B (R _c).	mm	1.60	1.60
Diámetros de las partíc. PuO ₂ .	mm	0.05; 0.10; 0.20; 0.40	

C.3. Redes de elementos finitos

C.3.1. Para los cálculos de la situación a):

Número de elementos finitos:	1024
Número de nodos:	561
Número de incógnitas:	528

C.3.2. Para los cálculos de las situaciones b), c) y d):

Número de elementos finitos:	768
Número de puntos nodales:	425
Número de incógnitas:	391

D. RESULTADOS

En las TABLAS I y II se resúmen los resultados más significativos de las cuatro diferentes situaciones para ambos tipos de barras. Se consignan en ellas las temperaturas en los puntos donde se observan las máximas diferencias ΔT entre éstas y las que tendrían en el mismo punto si no estuviese la partícula, y también el valor de estas diferencias, dentro de cada uno de los tres materiales (PuO_2 , UO_2 y vaina). Para las situaciones b), c) y d), obviamente en estos puntos no se producen necesariamente las máximas temperaturas. En la situación a), en cambio, ello sí ocurre.

De la información dada en estas tablas puede obtenerse el error introducido por la hipótesis de simetría de revolución para la zona B, antes mencionada. En efecto, si a las temperaturas máximas en la vaina de la barra C.N.A., por ejemplo, (que se producen sobre su superficie exterior) se les resta los correspondientes valores de ΔT (última columna) se obtiene una temperatura de 398°C , que supera en 10°C a la correcta (388°C) obtenida con la red de la figura 3 para la zona A en ausencia de la partícula. Este error evidentemente no tiene importancia para los fines del presente trabajo.

En la misma TABLA II se observa que, para el diámetro de

Situación de la partícula	Diámetro de la partícula (micrones)	Temp. en el punto de máximo incremento en cada material (°C)			Máximo incremento de temperatura (°C)		
		En el PuO_2	En el UO_2	En la vaina	En el PuO_2	En el UO_2	En la vaina
a)	50	2402.	2396.	365.	11.	4.	0.0
	100	2425.	2401.	365.	34.	9.	0.1
	200	2538.	2439.	365.	147.	47.	0.2
	400	3049.	2699.	366.	658.	307.	0.5
b)	50	550.	550.	374.	2.6	2.6	0.3
	100	584.	584.	378.	12.2	12.2	3.7
	200	699.	637.	388.	130.	68.	13.6
	400	1283.	960.	432.	660.	337.	58.
c)	50	518.	517.	374.	1.7	0.7	0.0
	100	541.	527.	376.	25.4	11.2	1.6
	200	631.	573.	386.	114.	57.	11.7
	400	1009.	808.	431.	447.	247.	57.0
d)	50	788.	788.	374.	2.9	2.9	0.0
	100	814.	814.	375.	17.0	17.0	0.3
	200	917.	850.	377.	148.0	82.0	2.6
	400	1510.	1158.	396.	742.0	389.	22.0

TABLA I.- Resultados principales para cada una de las situaciones de una partícula dentro de una barra combustible MZFR - Pu.

Situación de la partícula	Diámetro de la partícula (micrones)	Temperatura en el punto de máximo incremento en cada material (°C)			Máximo incremento de temperatura(°C)		
		En el PuO_2	En el UO_2	En la vaina	En el PuO_2	En el UO_2	En la vaina
a)	50.	2718.	2711.	388.1	9.	5.	0.0
	100.	2740.	2715.	388.1	34.	9.	0.0
	200.	2848.	2750.	388.2	142.	45.	0.1
	400.	3332.	2991.	388.5	626.	286.	0.4
b)	50.	559.	559.	399.	3.	3.	1.
	100.	586.	586.	401.	30.	30.	3.
	200.	777.	692.	410.	185.	136.	12.
	400.	1434.	1001.	458.	753.	445.	60.
c)	50.	579.	579.	399.	4.	4.	1.
	100.	606.	603.	400.	28.	25.	2.
	200.	718.	693.	411.	90.	65.	12.
	400.	1137.	1067.	458.	511.	380.	59.
d)	50.	848.	848.	399.	8.	8.	1.
	100.	860.	860.	399.	30.	30.	1.
	200.	1035.	922.	401.	172.	120.	3.
	400.	1658.	1192.	419.	795.	451.	21.

TABLA II - Resultados principales para cada una de las situaciones de una partícula dentro de una barra combustible tipo C.N.A. con Pu.

200 micrones, los máximos incrementos de temperatura se producen para la posición de la partícula más próxima a la vaina (situación b), mientras que para el diámetro de 400 micrones esto se verifica en la situación c). Esta diferencia es atribuible a una combinación de las características no lineales del problema y del efecto refrigerante de la vaina.

En las figuras 6 y 7 se grafican las distribuciones, en la dirección del radio de la barra que pasa por el centro de la partícula, de la temperatura para los distintos diámetros de la partícula y en ausencia de ésta, en cada una de las situaciones estudiadas. Para mostrar el efecto de la dependencia con la temperatura de la conductividad, se ha incluido en la figura 6 una distribución calculada con conductividades medias independientes de la temperatura [$K_{Zry}(350^\circ\text{C}) = 0.164 \text{ w/cm}^\circ\text{C}$; $K_{UO_2}(1300^\circ\text{C}) = 0.0235 \text{ w/cm}^\circ\text{C}$].

Finalmente, en la figura 8 se muestra una salida por impresora del Programa AXICUARM que muestra la distribución espacial de la temperatura para la situación d) de la partícula en una barra C.N.A., de 400 micrones de diámetro. Los límites de cada franja son isothermas equiespaciadas.

E.- OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

En ausencia de la partícula de PuO_2 , las distribuciones de temperatura en la zona B indicada en la Figura 1 y obtenidas bajo la hipótesis de simetría de revolución en dicha zona, coinciden satisfactoriamente con las que para posiciones equivalentes se calculan con la red de la zona A, lo que confirma la validez de dicha aproximación adoptada para la primera. Un orden de magnitud de los errores introducidos fue señalado en la sección precedente.

Es notoria la implicancia que tiene sobre los resultados la dependencia con la temperatura de la conductividad del UO_2 . Respecto del cálculo lineal (coeficientes independientes de la temperatura), las diferencias mayores son del orden del

10% en ausencia de la partícula (ver Figura 6).

Dado que la temperatura de fusión del UO_2 (y presumiblemente también la del PuO_2) es de aproximadamente 2800°C , los resultados obtenidos para una partícula de 400 micrones en la situación a) en ambos tipos de barras pierden su validez. No obstante, estos han sido también incluidos en las TABLAS I y II en la figura 6, puesto que los incrementos ΔT de temperatura hallados no tienen por qué diferir excesivamente para otros puntos del interior de la pastilla, en que la temperatura máxima correspondiente sea menor que dicho punto de fusión.

El sobrecalentamiento de la vaina es en proporción muy pequeño en todos los casos estudiados. Esto se debe a la acción del refrigerante que mantiene a temperatura constante T_e la superficie exterior de la misma, y a la suposición de que en las situaciones b) y c) la presencia de la partícula no altera la conductividad del espacio gaseoso entre la vaina y la pastilla en el lugar en que aquélla se encuentra. Según se observa en las TABLAS, la máxima temperatura a que dicha superficie llega es de 458°C (caso b; $\emptyset = 400$ micrones).

Es interesante, por último, cotejar los valores de los incrementos de temperatura obtenidos con los que corresponden a una partícula esférica de PuO_2 en un medio homogéneo e indefinido de UO_2 , situación para la cual la ecuación de conducción de calor (1) lineal y estacionaria tiene solución exacta. El valor absoluto de la temperatura obviamente diverge, pero el incremento $\Delta T(r)$ motivado por la presencia de la partícula vale:

$$\text{En el } \text{PuO}_2: \quad \Delta T(r) = \frac{Q_1 - Q_2}{6K} (3R^2 - r^2)$$

$$\text{En el } \text{UO}_2: \quad \Delta T(r) = \frac{Q_1 - Q_2}{3K} \frac{R^3}{r}$$

donde Q_1 y Q_2 son las generaciones de calor en el PuO_2 y en el UO_2 respectivamente, K la conductividad común a ambos materiales (aproximación empleada en los cálculos descriptos), y R el radio de la partícula. Los máximos valores de ΔT en cada material serán entonces:

$$\text{En el } \text{PuO}_2: \quad \Delta T(0) = \frac{Q_1 - Q_2}{2K} R^2$$

$$\text{En el } \text{UO}_2: \quad \Delta T(R) = \frac{Q_1 - Q_2}{3K} R^2$$

Con los datos de C.1. para el caso de la barra C.N.A. con plutonio, y una conductividad media constante de $K=0.0235 \text{ w/cm}^\circ\text{C}$, se obtienen para cada diámetro de la partícula los resultados mostrados en la TABLA III. Se ve que éstos son acordes con los correspondientes resultados de las TABLAS I y II.

Diámetro de la partícula (micrones)	Radio (mm)	$\Delta T(0)$ ($^\circ\text{C}$)	$\Delta T(R)$ ($^\circ\text{C}$)
50	0.025	13	9
100	0.050	55	37
200	0.100	223	149
400	0.200	892	595

TABLA III

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro agradecimiento a la Sra. Bibiana Cruz, del Centro de Cómputos del C.A.B., por la eficaz colaboración prestada en la construcción automática de las redes de elementos finitos.

APENDICE

CALCULO DE LAS GENERACIONES DE CALOR EN CADA MATERIAL COMBUSTIBLE

Designamos con los subíndices 1 y 2 a las magnitudes correspondientes al óxido de plutonio (PuO_2) y al óxido de uranio (UO_2) respectivamente. En la suposición de que la presencia de la partícula de PuO_2 no afecta al flujo neutrónico térmico $\phi_{\text{term}}(\vec{r})$ en el lugar que ocupa dentro de la pastilla de UO_2 , la relación entre las generaciones de calor en ambos materiales es:

$$R = \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\sum_f^1 \phi_{\text{term}}(\vec{r})}{\sum_f^2 \phi_{\text{term}}(\vec{r})} = \frac{(\delta_1/A_1) \sigma_f^1}{(\delta_2/A_2) \sigma_f^2}$$

donde $\sum_f^1$ y $\sum_f^2$ son las secciones eficaces de fisión para neutrones térmicos; δ_1 y δ_2 las densidades; A_1 y A_2 los pesos moleculares; y σ_f^1 y σ_f^2 las secciones eficaces microscópicas de fisión del PuO_2 y del UO_2 respectivamente.

De [3]:

$$\delta_1 = 11.46 \text{ g/cm}^3;$$

$$\delta_2 = 10.96 \text{ g/cm}^3$$

$$A_1 = 274.$$

$$A_2 = 270.$$

Tomamos para el plutonio la composición isotópica que tiene el generado de un elemento combustible tipo C.N.A. con un quemado de 7.200 MwD/T [4]:

$$\text{Pu}^{239}: 64\%$$

$$\text{Pu}^{240}: 28\%$$

$$\text{Pu}^{241}: 8\%$$

Con los valores de las secciones eficaces de fisión de [5], resulta:

$$\sigma_f^1 = 0.64 \times 742.5 + 0.08 \times 1000.9 = 555 \text{ barns.}$$

$$\sigma_f^2 = 0.0072 \times 582.2 = 4.19 \text{ barns}$$

luego:

$$R = 136.$$

Por ejemplo, para la barra C.N.A., tomamos como generación de calor en el UO_2 a la que corresponde a 687 watios por cm. de longitud de barra combustible si no estuviese la partícula de PuO_2 :

$$Q_2 = \frac{687 \text{ w}}{\pi(0.916 \text{ cm})^2 \times 1 \text{ cm}} = 0.775 \text{ w/mm}^3.$$

Por lo tanto:

$$Q_1 = R.Q_2 = 105.5 \text{ w/mm}^3.$$

REFERENCIAS

- [1] CROZIER, R.J.M.; "THISTLE-A Program to Determine the Three-Dimensional, Steady-State Temperature and Heat Flux Distributions in Inhomogeneous Nuclear Fuel Elements". AECL-4253-Chalk River, Ontario (June, 1972)
- [2] BASOMBRIIO, F.G.; CRUZ, B.; "Resolución por elementos finitos de la ecuación cuasiarmónica bidimensional. (Programas - "CUARM", "AXICUARM", "NOLICUARM")". CAB/1976/2 - Centro Atómico Bariloche, C.N.E.A. (1976).
- [3] WEAST, R.C.(Ed.); "Handbook of Chemistry and Physics". CRC-PRESS- 55th Edition (1974-1975).
- [4] KUCHLE, M.; PIERONI, N.; "Possibilities of Reactor Physics Experiments with a view to Plutonium Recycling in the Atucha Reactor (Oct.17,1974)-Kernforschungszentrum Karlsruhe.
- [5] MUGHABGHAB, S.F.; GARBER, D.I.; "Neutron Cross Sections - Vol.I, Resonance parameters - BNL-325.3th.Edition.Brookhaven National Laboratory (June 1973).
- [6] MONTENERO, C.; ROCCA, U.V.; "PIZZA-Código para el análisis termomecánico de barras combustibles tipo C.N.A."-CNEA-NT 18/76 (1976).

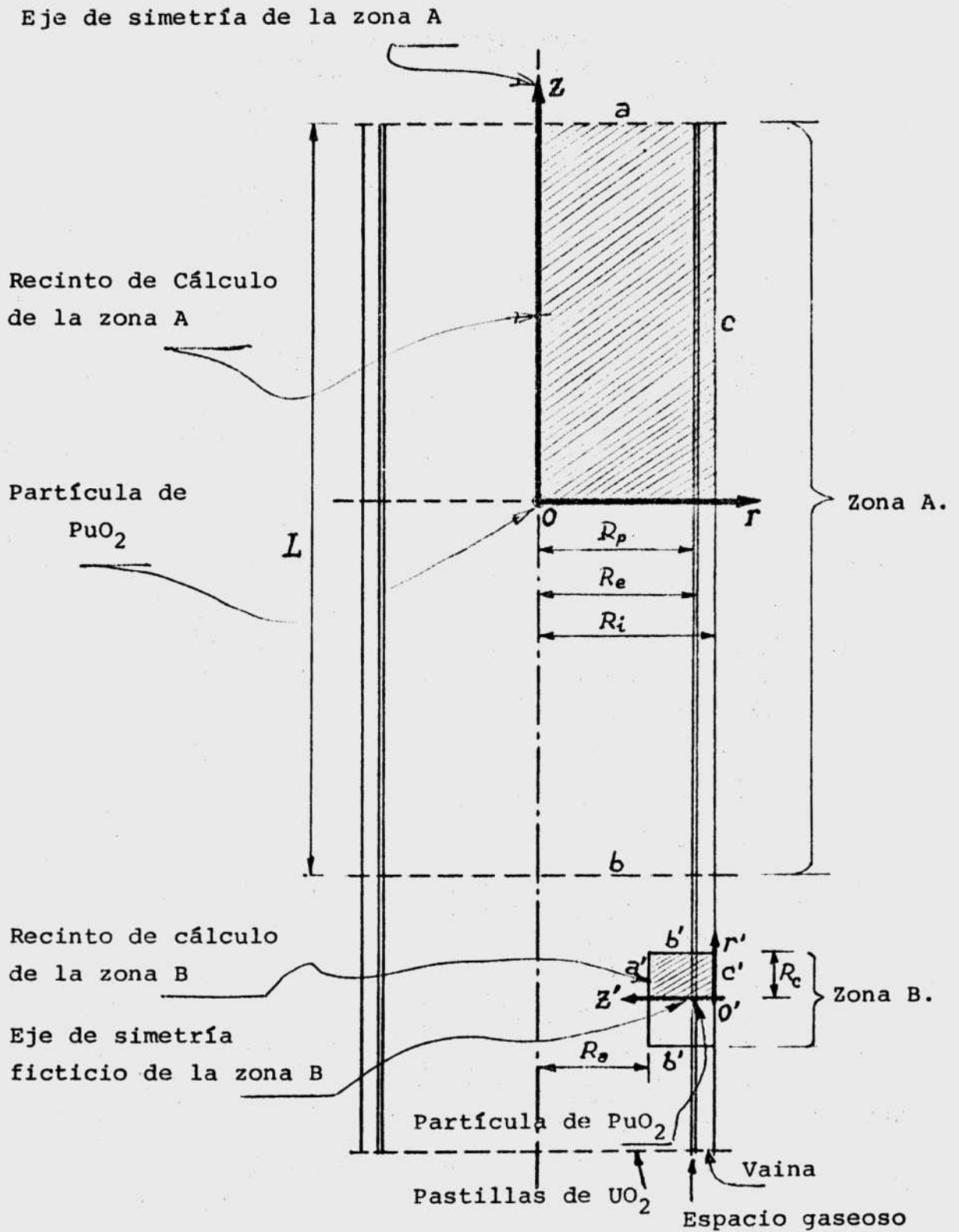


FIGURA 1.- Zonas A y B de la barra combustible y ubicación de sus respectivos recintos de cálculo.

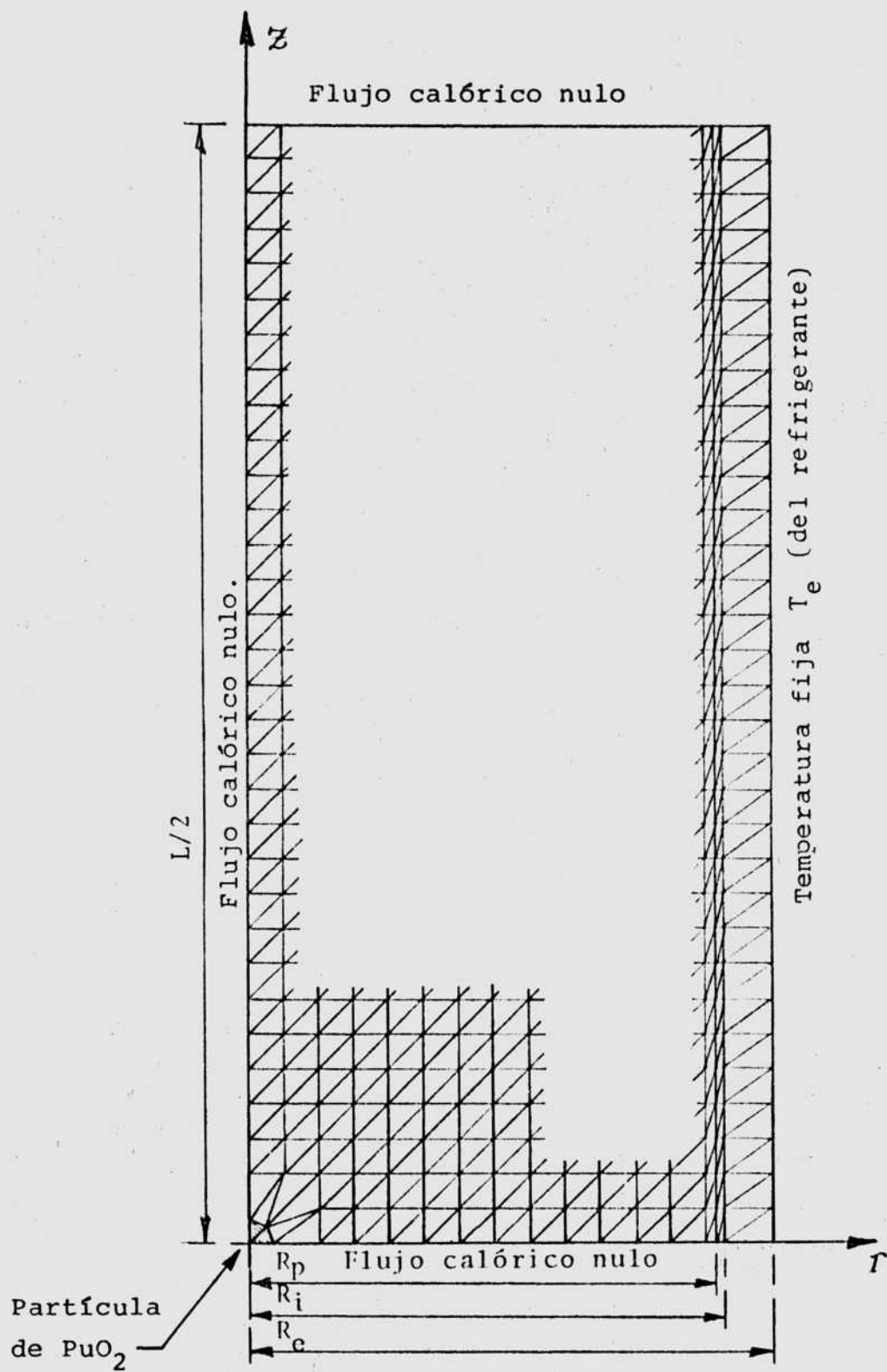


FIGURA 2.- Red de elementos finitos para la zona A.

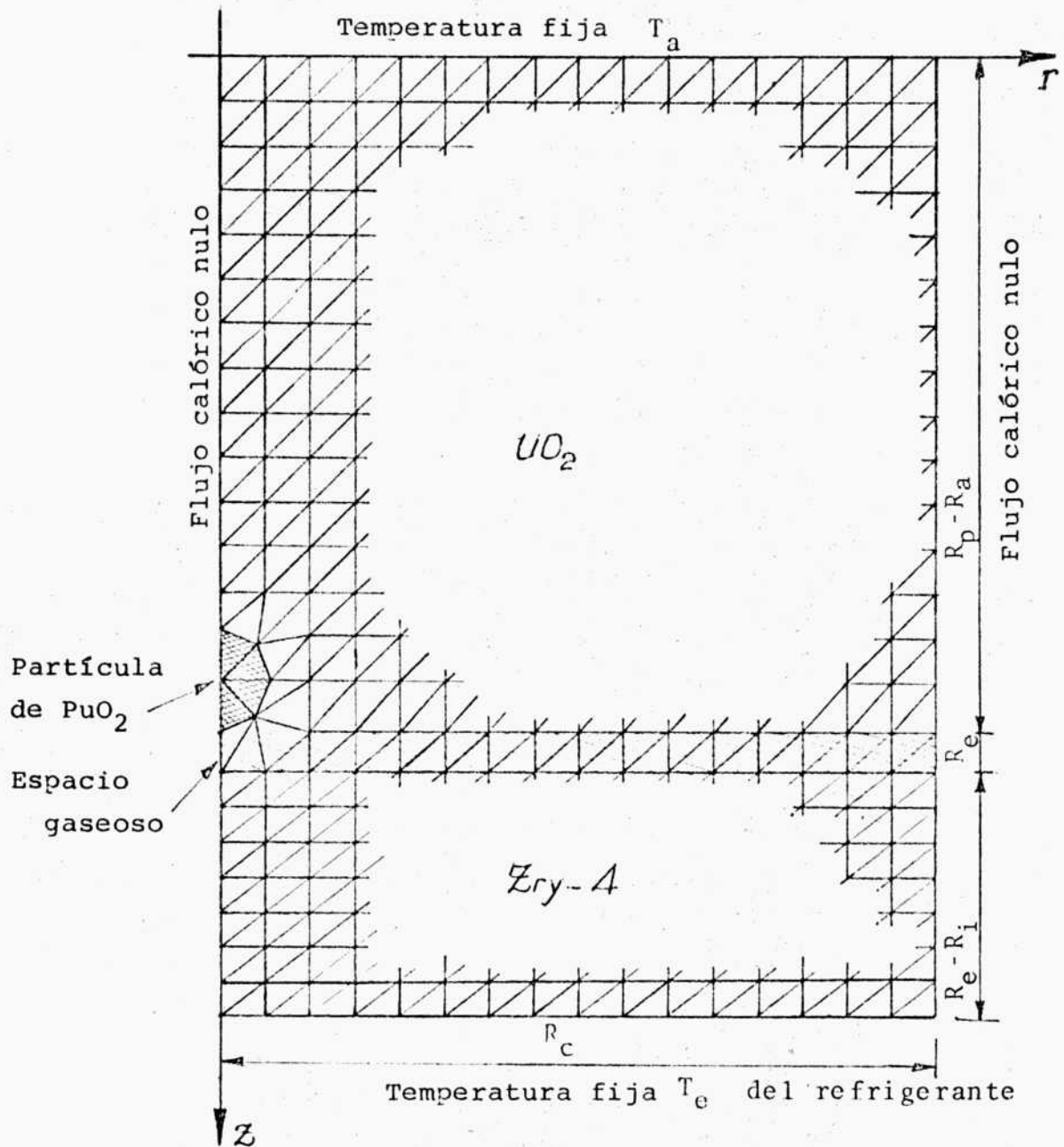


FIGURA 3.- Red de elementos finitos para la zona B, (situación b; $\phi = 200 \mu$).

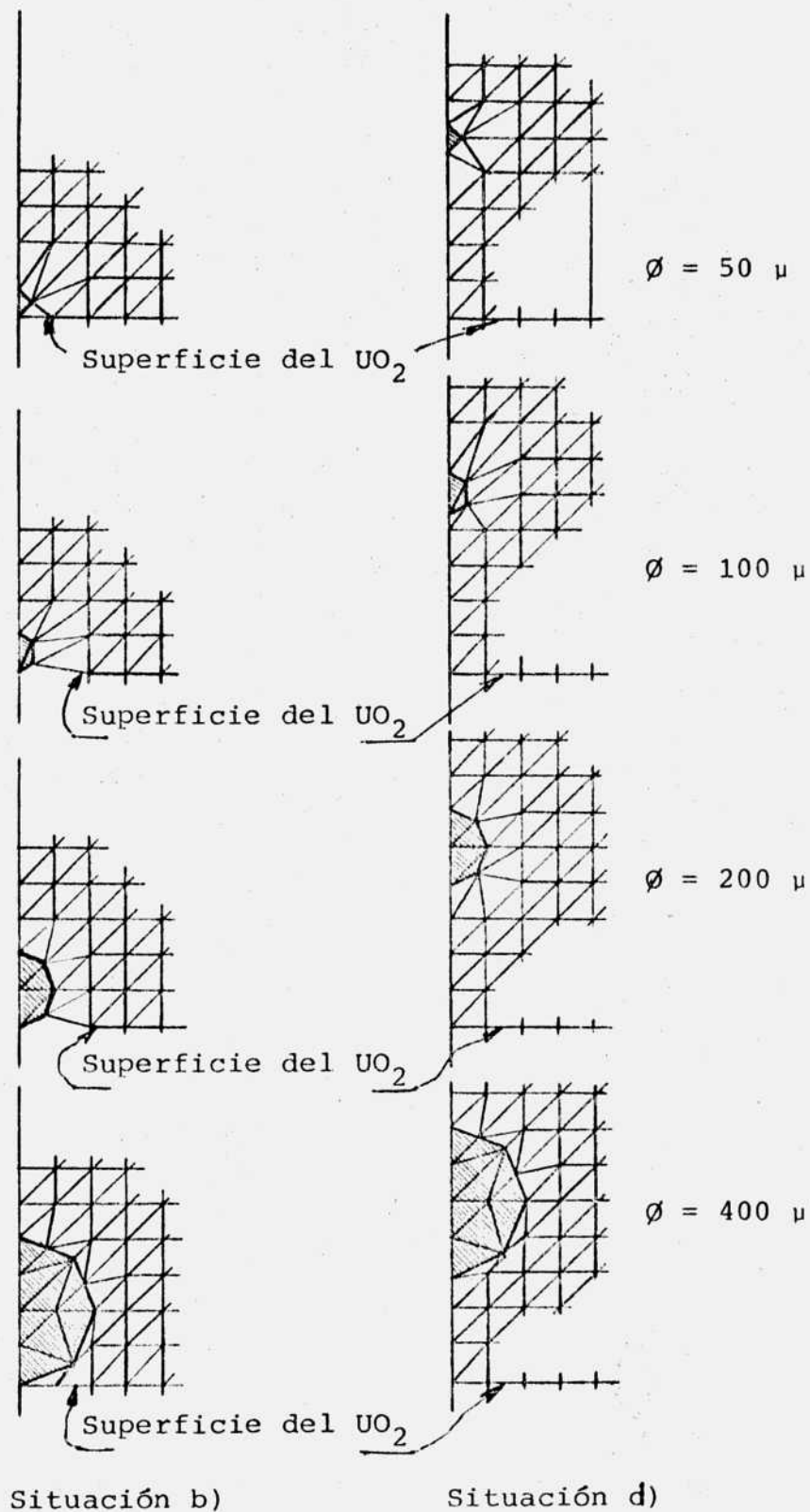
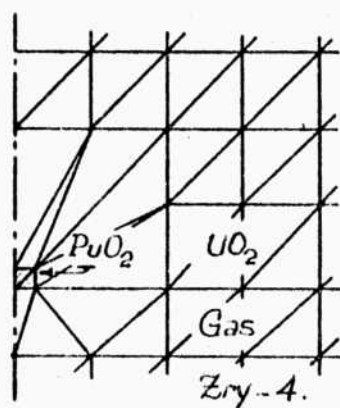
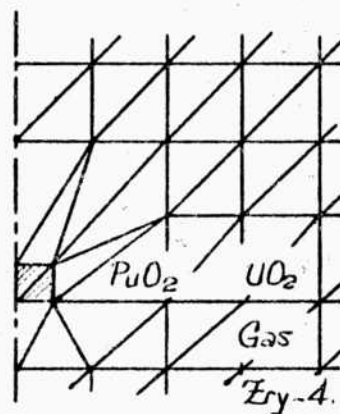


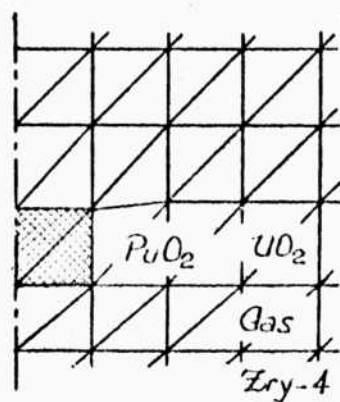
FIGURA 4.- Conformaciones locales de la red de la figura 3 en el lugar de la partícula de PuO_2 , para las situaciones b) y d) y cada uno de los distintos diámetros.



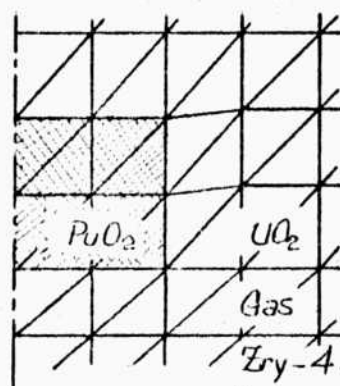
$\phi = 50 \mu$



$\phi = 100 \mu$



$\phi = 200 \mu$



$\phi = 400 \mu$

FIGURA 5.- Conformaciones locales de la red de la figura 3 en el lugar de la partícula de PuO_2 , para cada dimensión, correspondientes a la situación c).

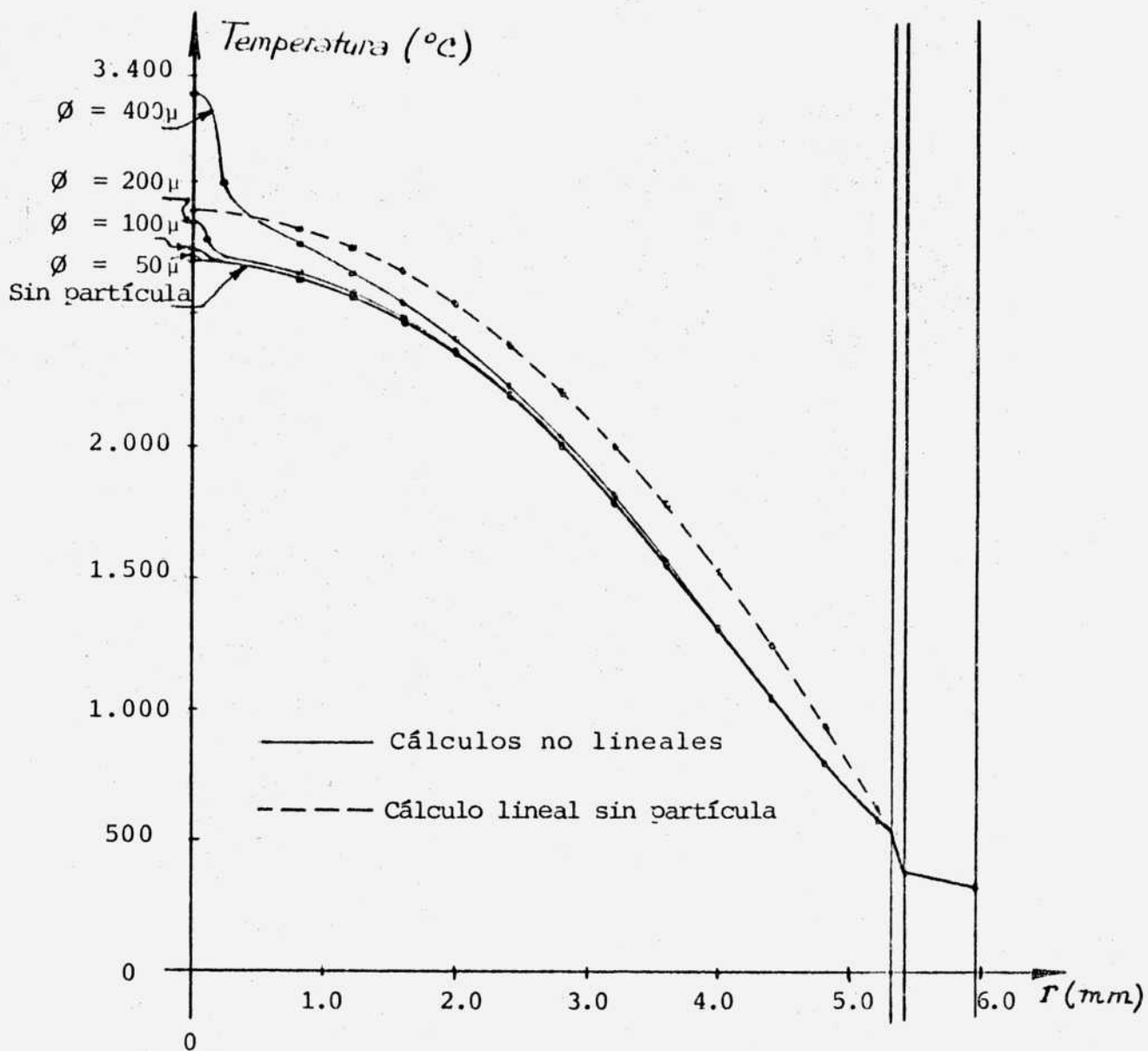


FIGURA 6.- Distribución radial de la temperatura para la situación a), sobre una recta perpendicular al eje de la barra que pasa por el centro de la partícula. (Caso de la barra C.N.A.)

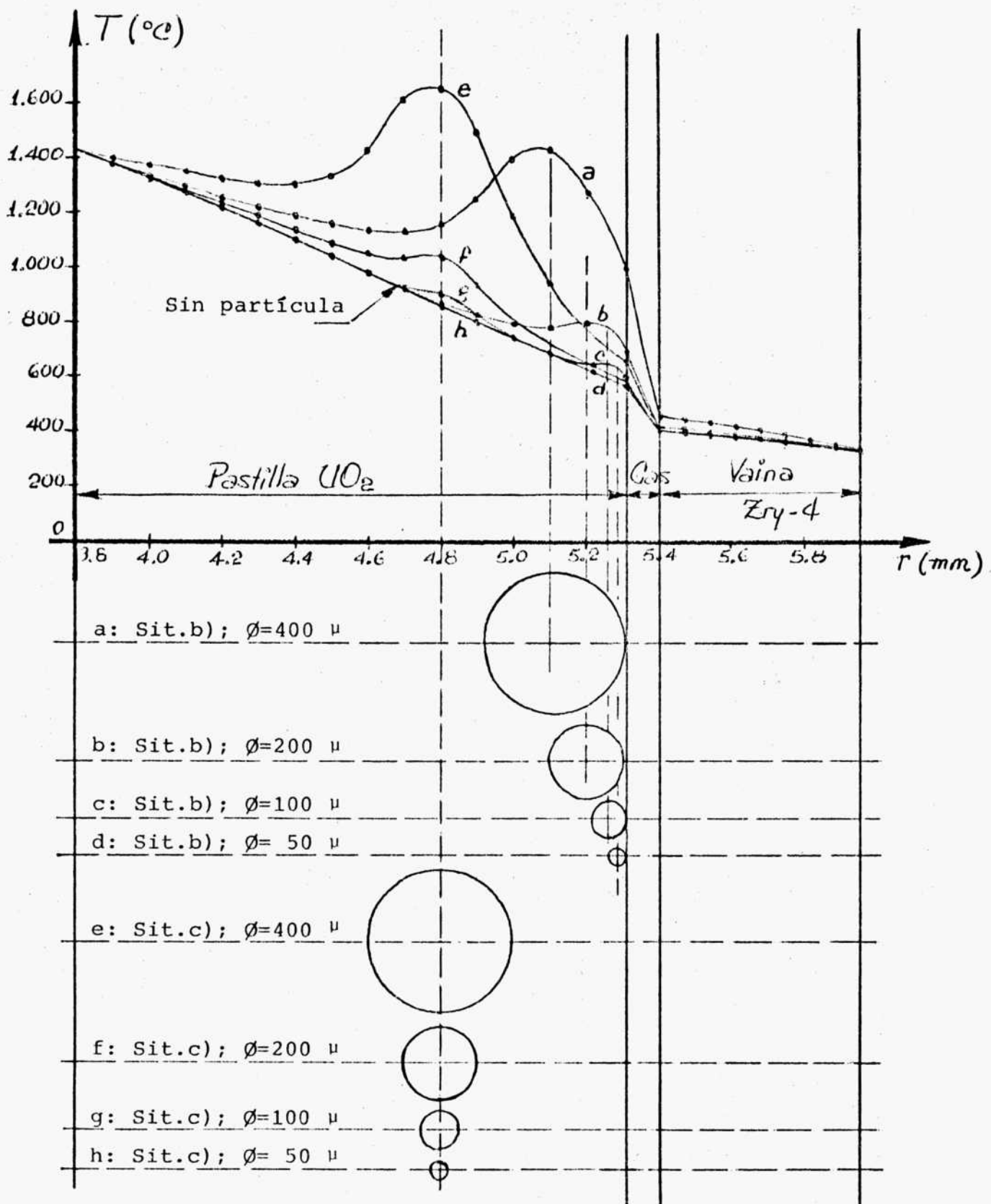


FIGURA 7.- Distribución radial de la temperatura para la situación b) y c), sobre una recta perpendicular a la vaina que pasa por el centro de las partículas. Se indican las posiciones de ésta para cada caso. (Barra combustible C.N.A.)

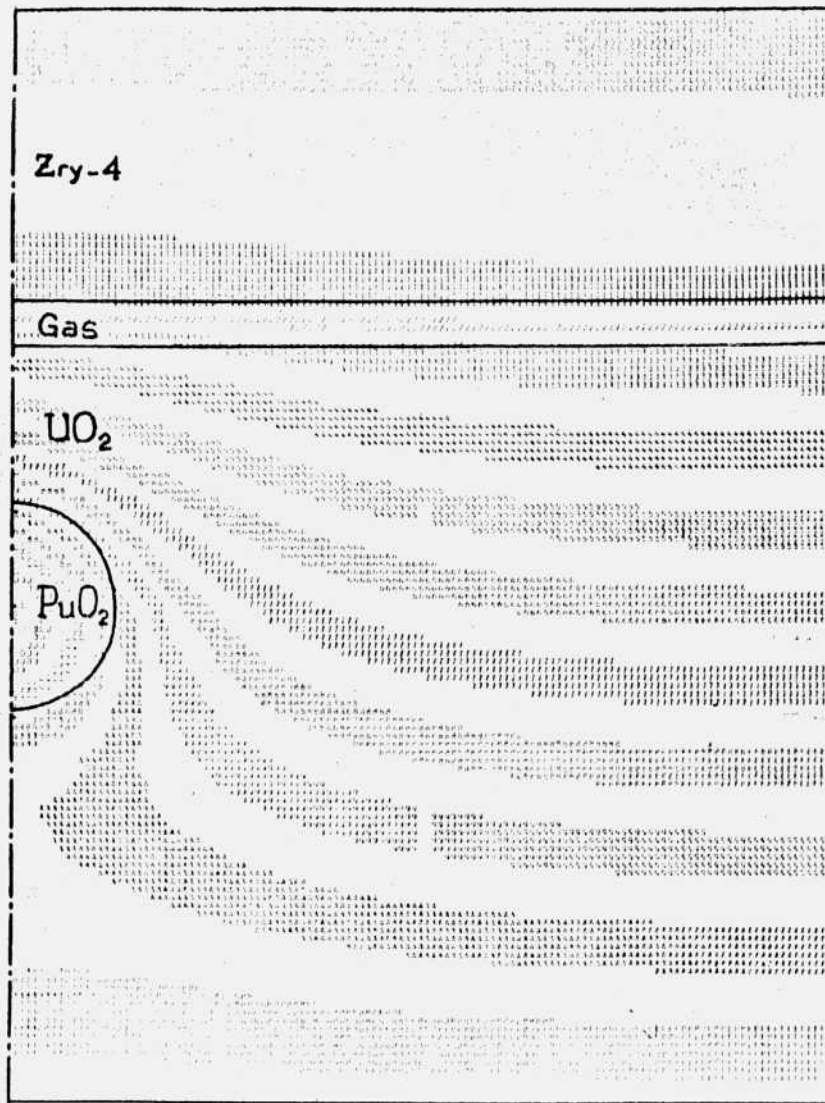


FIGURA 8.- Distribución espacial de la temperatura para la situación c) y $\phi = 400 \mu$. Los límites de cada franja son isotermas equiespaciadas. (Barra combustible C.N.A.)