

04.79.04

C. N. E. A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
NO 3	AÑO 1979

CNEA-NT 2/79

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

DISTRIBUCION DE LA TEMPERATURA EN LA ZONA DE LAS ARANDELAS
DE DILATAACION DE UNA BARRA COMBUSTIBLE TIPO CNA.

Por

G. SANCHEZ SARMIENTO (*),
Eduardo J. SAVINO (**) y
Santiago HARRIAGUE (**).

(*) Centro Atómico Bariloche, C.N.E.A.
San Carlos de Bariloche, Río Negro

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

Buenos Aires
Febrero de 1979.

RESUMEN

Se ha realizado un análisis de la distribución espacial de la temperatura en la zona de las arandelas de dilatación (de Zry-4) dentro de las barras combustibles de la Central Nuclear de Atucha (CNA), con el objeto de determinar las máximas temperaturas alcanzadas por las arandelas en una diversidad de situaciones de interés durante su quemado dentro del reactor, así como la influencia que la presencia de éstas tiene sobre la distribución de la temperatura en las vainas.

Para tal fin se ha resuelto numéricamente la ecuación de conducción del calor no lineal en dicho sistema, usando un código en elementos finitos.

Se ha concluído que para potencias características de algunos sectores de la zona I del reactor CNA, la temperatura en algunas zonas de las arandelas superaría la de transformación de fase del Zry-4, y en general dicha temperatura es suficiente como para absorber casi inmediatamente toda cantidad de hidrógeno que llega a su superficie. Además las temperaturas interiores de la vaina no parecen alterarse significativamente por la presencia de las arandelas, salvo en la situación en que ellas se consideren soldadas a la vaina a los efectos de la conducción térmica. En este último caso el gradiente térmico calculado sobre la vaina podría introducir localmente tensión térmica apreciable sobre ella.

A. INTRODUCCION

En el interior de la zona activa de cada una de las barras combustibles de la Central Nuclear de Atucha (C.N.A.) se hallan ubicadas 26 arandelas de dilatación uniformemente equiespaciadas en su longitud, con el fin de absorber diferencias longitudinales que se produzcan entre la columna de pastillas combustibles y la vaina. Estas diferencias se deben a la tolerancia axial en el diseño. En las primeras fases de la irradiación estas arandelas, además, deben absorber dilataciones diferenciales previas al contacto entre el combustible y la vaina.

Es pertinente el preguntarse cuáles son las temperaturas alcanzadas por las arandelas mencionadas durante el funcionamiento del reactor, así como la influencia de la presencia de ellas sobre la distribución local de la temperatura en la vaina y las pastillas. El conocimiento de ello es imprescindible a fin de considerar la posibilidad de hidruración y de cambio de fase del material de la arandela. También puede discutirse la existencia de cambios estructurales en la vaina debidos a la eventual elevación local de la temperatura sobre ella.

En este informe se describe un análisis del mencionado problema térmico, con resultados obtenidos resolviendo la ecuación de transferencia de calor en dicho medio, en varias situaciones de interés. En la Sección B se presenta la formulación del problema, mientras que en la Sección C se reseña el método de cálculo empleado. A su vez, todos los datos con los que se realizaron los cálculos se detallan en la Sección D y en los Apéndices I, II y III. Finalmente, en la Sección E se presentan los resultados de mayor significación, y el significado e implicancias de los mismos son discutidos en la Sección F.

B. FORMULACION DEL PROBLEMA

En la figura 1 se esquematiza una porción de la barra combustible en cuestión, mostrando una de las arandelas y los recintos de cálculo, mientras que la geometría y dimensiones de la arandela y de una pastilla combustible aparecen en las figuras 2 y 3 respectivamente. A los fines del cálculo se hace la aproximación de considerar a las dos pastillas adyacentes a la arandela y la vaina que las circunda como de longitud infinita. Esta aproximación está avalada por la baja conductividad térmica del cerámico fisionable que constituye la pastilla.

Se supone, además, que la arandela no produce efecto de apantallamiento sobre el flujo neutrónico en la vecindad de ambas pastillas adyacentes, que se traduciría en incrementos locales de la potencia térmica disipada en dicha zona.

El problema que nos ocupa está gobernado por la ecuación de conducción del calor no lineal (con conductividades dependientes de la temperatura) que para régimen estacionario y para sistemas de simetría de revolución como el planteado, en coordenadas cilíndricas toma la forma:

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

donde:

$\vec{r} = (r, z)$ representa ambas coordenadas cilíndricas r y z de cada punto;

$T(\vec{r})$ es la temperatura (incógnita a determinar);

$K(\vec{r}, T)$ es la conductividad térmica dependiente del material, de la posición r dentro de éste y de la temperatura; y

$\rho(\vec{r})$ es la generación de calor en el punto r por unidad de volumen.

Con las condiciones de contorno de convección forzada sobre la superficie exterior de la vaina, y de derivada nula respecto de la dirección normal sobre las secciones transversales (planos de simetría σ de zona asintótica) que limitan ambos recintos considerados en la figura 1, el problema queda unívocamente fijado.

Ahora bien; los diferentes cambios de dimensiones de cada uno de los componentes de la barra debidos a su dilatación térmica afectan a su vez la geometría del sistema, principalmente el espesor del espacio gaseoso entre las pastillas combustibles y la vaina, variando por consiguiente la resistencia térmica de dicho espacio, el cual a su vez constituye un parámetro fundamental determinante de la distribución de la temperatura en la misma. Es claro entonces que el problema de la distribución de la temperatura en este sistema está incondicionalmente acoplado a los efectos termomecánicos que ella produce. En el presente análisis se ha realizado la aproximación de tomar como dimensiones radiales de las pastillas y de la vaina, a las obtenidas mediante un cálculo termomecánico unidimensional del sistema dado, en idénticas condiciones, en ausencia de la arandela y con la hipótesis de simetría plana (independiente de la temperatura según la dirección longitudinal de la barra). Tales cálculos auxiliares fueron efectuados con el código BACO [8], desarrollado por el Grupo de Teoría de la Gerencia de Desarrollo de la C.N. E.A.

C. RESOLUCION DE LA ECUACION POR EL METODO DE ELEMENTOS FINI-
TOS. PROGRAMA NOLICUARM.

Para la resolución de la ecuación (1) se empleó el Código NOLICUARM [1], previamente elaborado en el Centro Atómico Bariloche (C.N.E.A.) y aplicado a gran cantidad de problemas análogos. Es éste un programa basado en el método numérico de elementos finitos, que da una solución aproximada de la ecuación (1) en sistemas de simetría plana o axial, con condiciones de contorno de Neumann o de Dirichlet en la frontera del recinto considerado.

Para el caso en que la ecuación (1) es lineal (las conductividades no dependen de la temperatura), el método consiste sintéticamente [1] en la determinación de una aproximación $T^n(\vec{r})$ de un mínimo $T(\vec{r})$ del funcional asociado a dicha ecuación:

$$J(v) = \iiint_{\Omega} [K \cdot (v_r^2 + v_z^2) + 2 \rho v] r dr dz + 2 \int_{\Gamma} b \gamma v r ds \quad (2)$$

donde v_r y v_z son las derivadas parciales de $v(r,z)$ respecto de r y z respectivamente, y γ es el valor impuesto a la derivada normal de la función incógnita $T(r,z)$ en la porción de frontera correspondiente. Para la minimización aproximada de (2) se divide el recinto Ω en un dado conjunto de polígonos (elementos finitos) y se supone una cierta variación aproximada $T^h(\vec{r})$ de la incógnita $T(\vec{r})$ dentro de cada uno de ellos, de manera que aquélla quede determinada por sus valores en los vértices (nodos) de dichos elementos.

El problema queda entonces reducido a la determinación de dichos valores nodales de $T^h(\vec{r})$ que constituyen un número finito de incógnitas, y que resultan de minimizar el funcional aproximado respecto de ellas. Esto conduce a un sistema lineal de igual número de ecuaciones que de incógnitas.

En este programa se emplean elementos toroidales de sección triangular trinodal, y polinomios de primer grado. El sistema lineal se resuelve por el algoritmo de eliminación de Gauss para matrices banda simétricas.

Ahora bien, cuando la conductividad $K(\vec{r}, T)$ depende de la temperatura $T(\vec{r})$, como ocurre en el caso en cuestión, el problema es no lineal y será necesario un proceso iterativo para su resolución. Adoptamos el de más simple concepción:

Se resuelve primero por el método bosquejado la ecuación (1) con sendas conductividades medias constantes para cada uno de los materiales. De la distribución espacial de la temperatura así obtenida, se calcula luego para cada elemento finito la conductividad $K(\vec{r}, T)$ para la temperatura media alcanzada en ellos, y con estos valores se resuelve nuevamente la ecuación (lineal) (1). Se continúa de esta manera el proceso hasta que todos los valores de las conductividades calculadas en una cierta iteración no difieran relativamente de las de la iteración anterior en más de una cierta cantidad prefijada.

D. DATOS DE CALCULO

D.1. Datos físicos

D.1.1. Conductividad térmica del óxido de uranio [2]:

$$K_{\text{UO}_2} = \left[\frac{38.24}{T + 129.4} + 4.79 \times 10^{-13} T^3 \right] \text{ w/cm}^\circ\text{K} \quad (3)$$

donde $T = T(x,y)$ es la temperatura (en $^\circ\text{K}$).

D.1.2. Conductividad térmica del Zircaloy-4 [3]:

$$K_{\text{Zry}} = (0.1145 + 1.425 \times 10^{-4} T) \text{ w/cm}^\circ\text{K} \quad (4)$$

donde T es la temperatura (en $^\circ\text{C}$)

D.1.3. Datos físicos de la mezcla de gases de llenado y de si- sión.

Se consideraron separadamente los tres casos siguientes:

- Caso a) La situación corresponde a la iniciación del quemado del elemento combustible dentro del reactor. El único gas existente dentro de la barra es He, incorporado en su fabricación, a aproximadamente 17 Atm. A los fines del cálculo se tomó exactamente 16.83 Atm.
- Caso b) La mezcla es de He, Xe y Kr, con una presión total de 70 Atm a la temperatura en el reactor. Se estima que esta presión es típicamente la que corresponde a etapas avanzadas de la irradiación. La cantidad de He es la incorporada en la fabricación de la barra (Caso a) y su cantidad no se modifica durante el quemado. El Xe y el Kr, en cambio, son productos de fisión, con una relación molar entre ellos de 13.31, considerando un quemado en el que se han producido un 60% de fisiones de

U^{235} y un 40% de fisiones de Pu (ver Apéndice I).

Caso c) Se considera una fisura en la vaina por donde penetra el refrigerante (agua pesada) dentro de la barra en estado de vapor, donde alcanza una presión parcial tal que la presión total de la mezcla iguala a la del refrigerante (115 Atm.). Suponiendo que no hay pérdidas posteriores de gases por dicha fisura, la mezcla de gases será la del caso b) más el contenido así resultante de vapor de agua pesada.

Para los casos b) y c) la composición molar y presiones parciales de cada componente de la mezcla de gases, en función de la temperatura, se dan en la TABLA I, y la variación de la conductividad térmica K_g con la temperatura se detalla en el Apéndice II, con datos numéricos en las TABLAS I y II.

D.1.4. Coeficientes de transferencia térmica de los espacios gaseosos.

D.1.4.1. Espacio gaseoso entre las pastillas y la vaina. Se considera que en este espacio, comprendido entre dos superficies casi paralelas muy próximas entre sí, la transmisión del calor se realiza tanto por conducción como por radiación. Su coeficiente de transferencia térmica (conductancia) estará dado entonces por la suma de dos términos:

$$h_g = h_{\text{cond}} + h_{\text{rad}} \quad (5)$$

donde [4]:

$$h_{\text{cond}} = \frac{K'_g}{2.5(R_{UO_2} + R_{Zry}) + \epsilon + \delta} \quad |w/cm^2 \cdot K| \quad (6)$$

es el coeficiente de transferencia térmica por conducción, siendo:

K'_g : la conductividad de la mezcla de gases dependiente de la temperatura (ver Apéndice II), en $w/cm^2 \cdot K$;

$R_{UO_2} = 0.125 \times 10^{-3}$ cm: la rugosidad media de la pastilla;

$R_{Zry} = 0.40 \times 10^{-3}$ cm; la rugosidad media de la vaina;

ϵ : la distancia de extrapolación en ambas superficies, dependiendo de la temperatura (Dada en Apéndice III), en cm;

δ : el espesor del espacio gaseoso, en cm,

y, además [5]:

$$h_{rad} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \cdot \frac{(T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2} \quad [w/cm^2 \cdot ^\circ K] \quad (7)$$

es el coeficiente de transferencia térmica por radiación, donde:

$\sigma = 5.669 \times 10^{-12} w/cm^2 (^\circ K)^4$ es la constante de Stefan-Boltzmann;

$\epsilon_1 = 0.8$ es la emisividad del UO_2 ;

$\epsilon_2 = 0.1$ es la emisividad del Zry-4;

T_1 es la temperatura sobre la superficie de la pastilla; y

T_2 es la temperatura sobre la superficie interna de la vaina.

Para considerar el primer término (6) de la ecuación (5), se supone que la capa de elementos triangulares que representa al espacio gaseoso de espesor δ , tiene una conductividad ficticia:

$$K_{gap} = h_{cond} \cdot \delta \quad (8)$$

y para tener en cuenta el segundo término (7), se le suma a (8) otra componente de la conductividad ficticia dada por:

$$h_{rad} \cdot d = \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \cdot d \cdot (T_1^2 + T_2^2) (T_1 + T_2) \quad (9)$$

D.1.4.2. Espacio gaseoso entre la arandela y la vaina. Al tener este espacio características idénticas a las del anterior, valen para su transferencia térmica las mismas expresiones (5-9), en las que debe reemplazarse todas las magnitudes del UO_2 por las del Zry-4.

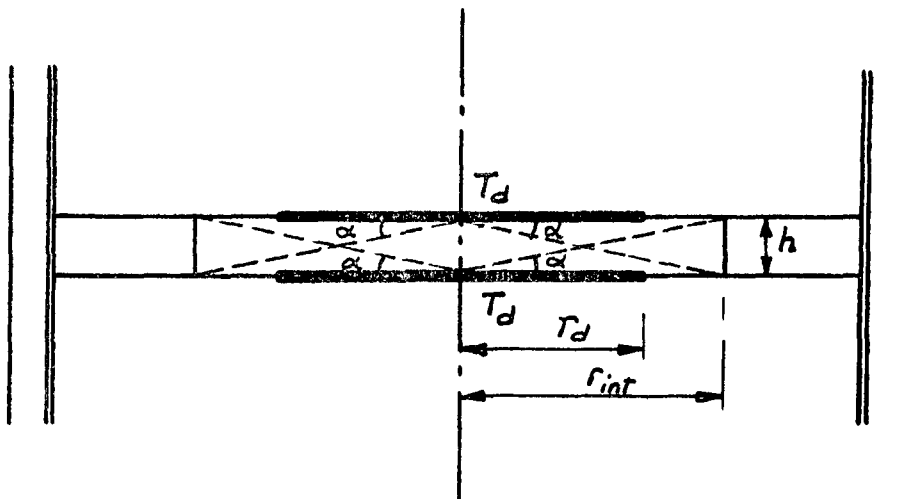
D.1.4.3. Espacio gaseoso entre las pastillas y la arandela. Para este espacio consideramos dos situaciones diferentes:

- a) Las concavidades en las caras planas ("dishings") de las pastillas tienen sus dimensiones originales;
- b) Ambos "dishings" han desaparecido por dilatación térmica e hinchado del material combustible.

En ambos casos la cavidad central no presenta la característica de lámina gaseosa entre dos superficies sólidas muy próximas, como los otros dos espacios anteriores. Se considera que la transferencia térmica tiene lugar tanto por conducción como por radiación. Para la conducción se toma directamente la conductividad de la mezcla gaseosa dependiente de la temperatura descrita en el Apéndice II para cada caso de D.1.3.

La transferencia térmica por radiación, por otra parte, podría ser considerada rigurosamente en el presente esquema de elementos finitos según tratamientos conocidos [14], pero el esfuerzo no justifica los fines presentes. Las características del problema permiten, en cambio, emplear un modelo muy simple para dicha transferencia térmica, que se esquematiza a continuación:

Dadas las características geométricas de la cavidad considerada, que idealizamos según la figura siguiente, y por la fuerte



variación de la energía irradiada con la temperatura ($E \propto T^4$), suponemos que la transferencia de calor se realiza solamente desde sendas zonas centrales circulares de ambos "dishings" (zonas de máxima temperatura que para estos fines la aproximamos constante de valor T_d en ellas), hacia la superficie interior cilíndrica de la arandela.

Dado que el ángulo α (ver figura) es pequeño, la cantidad de calor que fluye entre dichas superficies por segundo puede aproximarse por

$$Q_{\text{rad}} = \sigma T_d^4 \cdot 2S_d \frac{\alpha}{\pi/2}$$

donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann, y $S_d = \pi r_d^2$ es el área de cada una de las zonas circulares. La cantidad de calor por radiación que recibe la superficie interior de la arandela por segundo y por unidad de área vale entonces:

$$q_{\text{rad}} = \frac{Q_{\text{rad}}}{2\pi r_{\text{int}} \cdot h} = \frac{2\sigma T_d^4 r_d^2 \alpha}{\pi r_{\text{int}} h} \approx 2 \times 10^{-12} T_d^4 \quad [\text{w/cm}^2]$$

Por ejemplo, para $T_d = 2500^\circ\text{K}$, resulta $q_{\text{rad}} \approx 78 \text{ w/cm}^2$. Por otra parte, sin considerar este efecto de radiación, es decir, únicamente por conducción en la mezcla gaseosa, se obtiene un valor análogo

$$q_{\text{cond}} \approx 62 \text{ w/cm}^2$$

con la misma temperatura T_d sobre la superficie en cuestión. El efecto de la radiación es, por consiguiente, del mismo orden de magnitud que el de la conducción sobre dicha zona, de aquí que es importante considerarlo. Esto se lo llevó a cabo en el programa agregando a la conductividad del gas en el espacio dado un término ficticio de radiación variable con T_d^4 , con un coeficiente que se lo ajustó de manera que para un valor $T_d = 2500^\circ\text{K}$ el programa obtuviese un flujo de calor sobre dicha superficie de $q = q_{\text{rad}} + q_{\text{cond}} = (78 + 62) \text{ w/cm}^2$.

Para el caso a) mencionado, se postula un contacto solidario entre la pastilla y la arandela en una circunferencia sobre el borde del "dishing". Se considera entonces para el espacio gaseo

so determinado por estas condiciones geométricas, una transferencia térmica por conducción y por radiación según el tratamiento descrito.

En cambio, para el caso b), el contacto se realiza sobre toda la superficie plana de la arandela. En esta situación debe tomarse en cuenta la resistencia térmica de la lámina gaseosa entre dicha superficie plana y la cara plana de la pastilla. Esta reviste características idénticas a la considerada para el espacio entre las pastillas y la vaina (Sección D.1.4.1.), si se desprecia la presión de contacto.

D.1.5. Condición de contorno de convección forzada sobre la superficie exterior de la vaina.

La temperatura T_s sobre la superficie exterior de la vaina debe valer [6]:

$$T_s = T_{ref} + 4.45 e^{-p/6.207} \cdot \sqrt[4]{q} \quad (10)$$

donde:

$T_{ref} = 578^\circ\text{K}$ es la temperatura del refrigerante;

$p = 12.0 \text{ MPa}$ es la presión del refrigerante; y

$q [\text{Kw/m}^2]$ es el flujo de calor a través de dicha superficie.

La (10) puede escribirse en la forma:

$$q = 10^{-1} \left(\frac{1}{4.45} e^{p/6.207} \right)^4 \left(T_s - T_{ref} \right)^4 [\text{w/cm}^2] \quad (11)$$

lo cual puede ser implementado en el método de resolución suponiendo la existencia de una "capa límite" de espesor ficticio d , materializada por una capa de elementos finitos de ese espesor, con una conductividad ficticia dependiente de la temperatura:

$$K_{cl}(T) = 10^{-1} \left(\frac{1}{4.45} e^{p/6.207} \right)^4 \left(T_s - T_{ref} \right)^3 d [\text{w/cm}^\circ\text{K}] \quad (12)$$

lo cual está justificado por la hipótesis de variación lineal de la temperatura para el tipo de elementos triangulares trinodales empleado.

D.1.6. Potencia lineal

Para la generación de calor por unidad de longitud de barra y por segundo (potencia lineal), se ha tomado:

$W = 454 \text{ w/cm}$ para el caso a) de D.1.3.

$W = 457 \text{ w/cm}$ para los casos b) y c) de D.1.3.

$W = 520 \text{ w/cm}$ para una situación especial del caso b) de D.1.3.

D.1.7. Generación de calor puntual

Se han considerado dos hipótesis para la generación de calor en la pastilla por unidad de volumen y por segundo:

a) Variable con la coordenada radial:

$$Q(r) = Q_0 (a_0 + a_1 r^2 + a_2 r^4) \quad (12)$$

donde

$$a_0 = 0.65$$

$$a_1 = 0.70 \text{ cm}^{-2}$$

$$a_2 = 0.20 \text{ cm}^{-4}$$

$$Q_0 = W / \left[\pi (a_0 R^2 + \frac{1}{2} a_1 R^4 + \frac{1}{3} a_2 R^6) \right] \quad |w/cm^3|$$

$W =$ potencia lineal

$R =$ radio de la pastilla.

b) Uniforme dentro de la pastilla:

$$Q = W / (\pi R^2) \quad (13)$$

D.2. Datos geométricos

Para las tres dimensiones radiales siguientes, se tomaron las obtenidas con el Código BACO [8], según lo expresado en la sección B., para las condiciones especificadas en D.1. con la hipótesis de simetría plana (barra uniforme e indefinida en su dimensión longitudinal). Se consignan las correspondientes dimensiones a temperatura ambiente y presión atmosférica:

D.2.1. Radio de la pastilla	Caso a) de D.1.3.:	0.53949 cm.
	Casos b) y c) de D.1.3.:	0.54132 cm.
	de fabricación:	0.531 cm.
D.2.2. Radio interior de la vaina:	Caso a) de D.1.3.:	0.54118 cm.
	Casos b) y c) de D.1.3.:	0.54139 cm.
	De fabricación:	0.54 cm.
D.2.3. Radio exterior de la vaina:	Caso a) de D.1.3.:	0.59630 cm.
	Casos b) y c) de D.1.3.:	0.59649 cm.
	De fabricación:	0.595 cm.

Además:

D.2.4.: Radio exterior de la arandela: Igual al radio de la pastilla.

Y para las siguientes dimensiones se tomaron los valores conocidos a temperatura ambiente y presión atmosférica:

D.2.5.: Altura de la pastilla:	1.20 cm.
D.2.6.: Máxima profundidad del "dishing" inicial:	0.024 cm.
D.2.7.: Radio del borde del "dishing" inicial:	0.470 cm.
D.2.8.: Radio interior de la arandela:	0.350 cm.
D.2.9.: Espesor de la arandela extendida:	0.170 cm.
D.2.10.: Espesor de la arandela <u>aplastada</u> :	0.065 cm.

D.3. Redes de elementos finitos.

D.3.1. Para la geometría considerada (recinto a de la figura 1, y figura 4):

Número de nodos "incógnita":	525
Número de nodos "dato":	21
Número de elementos:	1000

D.3.2. Para la pastilla sin arandela, o zona asintótica (recinto b de la figura 1)

Número de nodos "incógnita":	475
Número de nodos "dato":	19
Número de elementos:	900

Magnitud		Helio	Xenón	Kriptón	Vapor D ₂ O
Presión parcial (At) (T=temp.en °K)		$p_1 = \frac{16.83xT}{293}$	$p_2 = \frac{(70-p_1)15.31}{16.31}$	$p_3 = \frac{70-p_1}{16.31}$	$p_4 = 45.$
Concentra- ción molar.	Caso a)	1.	-	-	-
	Caso b)	$p_1/70$	$p_2/70$	$p_3/70$	-
	Caso c)	$p_1/115.$	$p_2/115.$	$p_3/115.$	$p_4/115.$
Peso molecular M_i [g]		4.0	131.3	83.7	20.0
Conducti- vidad térmica	λ_i' [w/cm°K]	$1.68x10^{-3}$	$0.066x10^{-3}$	$0.104x10^{-3}$	TABLA II
	λ_i'' [1/°C]	$1.589x10^{-3}$	$1.6x10^{-3}$	$1.6x10^{-3}$	
Const.de Sutherland S_i [°K]		79.0	248.0	179.0	99.0
Calor esp.pr.cte. C_p [J/g°K]		5.19	0.16	0.25	TABLA II
Relación calores esp. C_v/C_p		0.60	0.63	0.60	0.60
Camino libre medio l_m [10^{-5} cm]		1.73	0.34	0.48	1.47
Coéf.acomodación gas i ($\alpha_{1i}=\alpha_{2i}$)		0.227	0.813	0.819	0.346

TABLA I.- Datos físicos de los gases de llenado y de fisión y del vapor de agua pesada.-

T [°C]	C _p [J/g°K]	λ [10 ⁻⁴ w/cm°K]	T [°C]	C _p [J/g°K]	λ [10 ⁻⁴ w/cm°K]
318.36	5.4547	8.539	560	2.4318	8.652
320	5.1710	8.421	570	2.4262	8.776
330	3.9585	7.882	580	2.4228	8.902
340	3.1389	7.548	590	2.4188	9.029
350	2.5281	7.339	600	2.4166	9.157
360	3.7963	7.210	610	2.4152	9.287
370	3.5365	7.138	620	2.4144	9.417
380	3.3354	7.106	630	2.4142	9.548
390	3.1766	7.104	640	2.4145	9.680
400	3.0486	7.126	650	2.4153	9.813
410	2.9438	7.165	660	2.4163	9.946
420	2.8567	7.220	670	2.4176	10.08
430	2.7838	7.286	680	2.4191	10.21
440	2.7222	7.361	690	2.4208	10.35
450	2.6700	7.445	700	2.4226	10.48
460	2.6257	7.535	710	2.4245	10.62
470	2.5881	7.631	720	2.4264	10.76
480	2.5562	7.732	730	2.4284	10.89
490	2.5293	7.837	740	2.4303	11.03
500	2.5066	7.946	750	2.4321	11.17
510	2.4875	8.058	760	2.4339	11.30
520	2.4716	8.172	770	2.4355	11.44
530	2.4585	8.289	780	2.4370	11.58
540	2.4476	8.408	790	2.4383	11.71
550	2.4388	8.529	800	2.4393	11.85

TABLA II.- Calor específico a presión constante y conductividad térmica, en función de la temperatura del vapor de agua pesada a una presión de 114 At. [9].

E. CALCULOS REALIZADOS

Se han considerado diez situaciones diferentes con variación de las siguientes magnitudes y parámetros:

- a) Mezcla de gases (Ver Sección D.1.3.);
- b) Estado de las concavidades en las caras planas ("dishings");
- c) Arandela totalmente aplastada o totalmente extendida;
- d) Transferencia térmica entre la arandela y la vaina;
- e) Valor de la potencia por unidad de longitud de barra;
- f) Variación radial o uniformidad de la generación de calor puntual.

En términos de estos elementos, en la TABLA III son descritas cada una de las situaciones consideradas. Correspondientes a ellas según dicha TABLA, en las figuras 5 a 14 se muestran las distribuciones radiales y axiales de la temperatura obtenidas sobre las direcciones de mayor interés en la zona de la arandela, y se las compara con las que resultan en la misma zona si no estuviese dicha arandela (o bien, en zona análoga suficientemente alejada de ella). El origen para la coordenada axial Z en cada uno de los tres gráficos inferiores de cada figura, se toma correspondiendo con el plano de simetría de la arandela paralelo a sus caras planas en el caso de la presencia de estas.

Por último, en la figura 15 se presenta el mapa de isotermas para la situación I, tal como se obtiene del código NOLICUARM.

F. DISCUSION DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Analizaremos primeramente los resultados obtenidos para la arandela, para luego discutir la influencia cuantitativa que la presencia de ésta produce sobre la temperatura en la vaina.

Comparando las figuras 5.a y 9.a, vemos que, con la dimensión original de los dishings, el máximo valor calculado de la temperatura sobre la arandela cuando el único gas que se encuentra dentro de la barra es He (Caso a, situación I), es

Parámetros	Sit. I	Sit. II	Sit. III	Sit. IV	Sit. V	Sit. VI	Sit. VII	Sit. VIII	Sit. IX	Sit. X	
	Fig. 5	Fig. 6	Fig. 7	Fig. 8	Fig. 9	Fig. 10	Fig. 11	Fig. 12	Fig. 13	Fig. 14	
Mezcla de gases (Casos de D.1.3.)	Caso a)										
Profundidad del "dishing"	Inicial		Nula		Inicial		Nula		Inicial	Nula	
Aplastamiento de la arandela.	Totalm. aplastada	Totalm. extendida	Totalmente aplastada								
Transferencia térmica entre arandela y vaina.	Dada en la Sección D.1.4.1.		$h_g = \infty$ (soldada)		Dada en la Sección D.1.4.1.						
Potencia lineal.	454 w/cm				457 w/cm		520 w/cm		457 w/cm		
Generación puntual de calor	Variable con el radio, Exp. (12)				Uniforme, Exp. (13)			Variable con el radio, Exp. (12)			

TABLA III.- Descripción de las situaciones consideradas correspondientes a cada figura.-

mayor (en unos 45°C) que el obtenido con una contaminación de este gas por Xe y Kr a 70 atmósferas (Caso b, situación V), pese a que esta relación se invierte sobre la superficie externa de la arandela enfrente de la vaina. Esto se debe a la mejor conductividad del gas en el primer caso respecto del segundo, tanto en el espacio interior entre la arandela y las pastillas, como entre la arandela y la vaina.

Al anularse el dishing de las pastillas por efecto del hinchado y de la dilatación térmica del combustible, la temperatura de la arandela aumenta respecto de las situaciones en que los dishings tienen su dimensión original, tanto para He (Caso a) como para la mezcla de He, Kr y Xe (Caso b) en los espacios gaseosos. Para el caso a) el máximo incremento es de 50°C (ver figuras 5.a y 7.a), mientras que para el caso b) éste es de unos 200°C). Estos aumentos de temperatura se deben a que la arandela toma contacto con zonas más calientes de las pastillas al eliminarse ambos dishings.

Comparando las figuras 8.a y 7.a se aprecia por otra parte cuánto baja la temperatura cuando, además de anularse los dishings y habiendo sólo He en los espacios gaseosos, la arandela toma contacto térmico perfecto con la vaina. Este decremento es de 150°C sobre el borde interior de la arandela, aún cuando ahora ésta soporta un gradiente térmico medio de unos $1600^{\circ}\text{C}/\text{cm}$.

Si se compara la figura 6.a con la 5.a, se observa un fuerte decremento de temperatura sobre la arandela (160°C en su borde interior), producida por la extensión de ésta según su espesor, lo cual era de esperar por la disminución de la producción de calor en esa zona.

La consideración de la variación radial del flujo neutrónico en los cálculos presentes es prácticamente irrelevante, para la temperatura calculada sobre la arandela, lo que resulta de comparar la figura 11.a con la 10.a.

En la figura 12.a se observa que para una generación de calor uniforme de $520\text{ w}/\text{cm}$, con la mezcla gaseosa de He, Kr y Xe,

y considerando anulados los dishings (Situación VIII), la arandela alcanza la máxima temperatura respecto del resto de las situaciones consideradas: 1330°K.

En los cálculos en que se simula la penetración de agua pesada en estado de vapor dentro de la barra, hasta que la presión total de la mezcla gaseosa iguala a la del refrigerante (115 atmósferas), se obtuvieron cambios de temperatura menores de 10°C con respecto a la ausencia de ella, según se observa en las figuras 13.a y 14.a si se las compara con las 9.a y 10.a respectivamente. Estas diferencias no son para nada significativas frente a los errores provenientes de las hipótesis y modelos usados, y a los propios del cálculo.

En la parte b de las figuras 5 a 14 se presentan distribuciones axiales de la temperatura calculadas sobre el eje de simetría de la barra, sobre una dirección longitudinal tangente a la superficie de la pastilla, y sobre la superficie interna de la vaina. Vemos que, con la excepción del caso en que la arandela está "soldada" a la vaina (Situación IV, figura 8.b), la variación axial de la temperatura sobre la superficie interior de la vaina debida a la presencia de la arandela no supera en ningún caso los 10°C. En cambio, para la situación mencionada de la figura 8.b, la máxima variación de temperatura sobre dicha superficie es de unos 47°C, con un gradiente de unos 50°C/cm.

Las principales conclusiones respecto de los resultados obtenidos a las que podemos arribar son las siguientes:

- i) Para potencias características de algunos sectores de la zona I del reactor de la Central Nuclear en Atucha, la temperatura en algunas zonas de las arandelas superaría la de transformación de fase del Zry-4.
- ii) En todos los casos las arandelas alcanzan una temperatura suficiente como para absorber casi inmediatamente toda cantidad de hidrógeno que llega a su superficie.
- iii) Las temperaturas interiores de la vaina no parecen alterarse significativamente por la presencia de las arandelas, salvo en el caso en que ellas se consideran "soldadas" a la

vaina a los efectos de conducción del calor.

iv) En este último caso el gradiente calculado sobre la vaina podría introducir localmente tensiones axiales de tracción apreciables. La evaluación de estas tensiones será el objeto de un próximo trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos aquí nuestro sincero agradecimiento a la Srta. Emma B. Rocchi por la amable colaboración prestada en la preparación de los gráficos.

REFERENCIAS

- [1] F.G.BASOMBRIÓ y B. CRUZ; "Resolución por elementos finitos de la ecuación cuasiarmónica bidimensional (Programas CUARM AXICUARM y NOLICUARM)" - CNEA-NT 31/78 (1978).
- [2] LYONS et al., GEAP-5100-I (1968).
- [3] C.MONTENERO y U.V.ROCCA; "PIZZA - Código para el análisis termomecánico de barras combustibles tipo CNA". CNEA-NT 18/76 (1976).
- [4] A.M. ROSS y R.L.STOUTE; "Heat transfer coefficient between UO_2 and Zircaloy 2". AECL 1552 (Junio 1962).
- [5] BADOS y ESTRADA; "Transmisión del calor", Edit.Aguilar (1956).
- [6] H.GVIRTZMAN; comunicación personal.
- [7] H.KÄMPF, H.ELBEL y F.DEPISCH; KFK-1575 (Sep.1972).
- [8] S.HARRIAGUE y E.J.SAVINO; "BACO, Código de simulación termomecánica de una barra combustible en un reactor de potencia" CNEA-NT 9/78 (1978).
- [9]
- [10] R.MILLER; "Heat and Thermodynamics". Interscience Publishers Inc., New York (1954), pág.271.
- [11] A.L. LINDSAY y L.A. BROMLEY; "Thermal Conductivity of Gas Mixtures", Ind.Eng.Chem.42, 1508-11, (1950).
- [12] D.R.OLANDER; "Fundamental Aspects of Nuclear Reactor Fuel elements". TID 26711.
- [13] "Charts of the Nucleons". Knolls Atomic Power Laboratories Ed.11. (1972)
- [14] S.PISSANETZKY; "The treatment of radiation phenomena in the finite element formulation of heat transfer problems".
Enviado a publicación.

APENDICE I

COMPOSICION MOLAR DE LA MEZCLA DE GASES DE LLENADO Y FISION

Los principales productos gaseosos de fisión que se desprenden a los espacios interiores de la barra son el Xe y el Kr. Se sabe [13] que por fisiones de U^{235} , la proporción en peso entre el Xe y el Kr producidos es de 16.63, y que por fisiones del Pu esa proporción es de 35.1. Suponiendo que al final del quemado el total de fisiones producidas corresponden en un 60% al U^{235} y en un 40% al Pu, resulta que la proporción molar entre Xe y Kr es de:

$$\frac{n_{Xe}}{n_{Kr}} = 0.6 \times 16.63 \frac{M_{Kr}}{M_{Xe}} + 0.4 \times 35.1 \frac{M_{Kr}}{M_{Xe}} = 15.31 \quad (I.1)$$

donde M_{Xe} y M_{Kr} son los pesos moleculares del Xe y del Kr respectivamente.

Por otra parte, en la fabricación de las barras combustibles se incorpora He a unas 17 atm (se tomó 16.83 para los cálculos presentes), a temperatura ambiente. Esta cantidad no se modifica durante el quemado. Considerando una presión total de gases de 70 Atm, despreciando el resto de productos menores de fisión, y suponiendo que los tres gases se comportan como gases ideales, resultan de (I.1) las composiciones molares y presiones parciales dependientes de la temperatura que se indican en la TABLA I.

Para el caso de filtración de agua pesada dentro de la barra (D.1.3.c), el análisis es totalmente similar. La cantidad de agua pesada en estado de vapor será tal que la presión total de gases en el interior de la barra debe igualar a la presión del refrigerante, resultando las concentraciones mostradas en la TABLA I.

APENDICE II

CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LA MEZCLA DE GASES

Para el He, el Kr y el Xe, suponemos una variación lineal de la conductividad térmica con la temperatura:

$$k_i = \lambda_i' (1 + \lambda_i'' T) \quad (II.1)$$

donde las constantes λ_i' y λ_i'' están dadas en TABLA I, con T en °C. Para el vapor de agua pesada, por otra parte, adoptamos los valores de la TABLA II, extraídos de [9]. Suponemos también que para estos cuatro gases la conductividad no varía con la presión, resultando predicho por la teoría cinética de los gases para gases ideales [10].

En cuanto a la conductividad de la mezcla de gases, adoptamos dos modelos distintos:

a) Para los espacios gaseosos de los "dishings" de las pastillas, y entre la arandela y las pastillas, consideramos válido el modelo de Lindsay y Bromley [11] que predice una conductividad de la mezcla de gases dada por:

$$K_g = \sum_{i=1}^N \frac{k_i}{1 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N B_{ij} C_j / C_i} \quad (III-2)$$

en la cual:

$$B_{ij} = \frac{1}{4} \left\{ 1 + \left[\frac{u_i}{u_j} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{3/4} \frac{\bar{T} + S_i}{\bar{T} + S_j} \right]^{1/2} \right\}^2 \frac{\bar{T} + \sqrt{S_i S_j}}{\bar{T} + S_i}$$

$$\frac{u_i}{u_j} = \frac{k_i}{k_j} \frac{C_{pj}}{C_{pi}} \frac{9 - 5 \frac{C_{vj}}{C_{pj}}}{9 - 5 \frac{C_{vi}}{C_{pi}}}$$

donde:

N : es el número de gases componentes de la mezcla;

C_i : es la concentración molar del gas i $\left(\sum_{i=1}^N C_i = 1 \right)$;

M_i : es el peso molecular del gas i ;

\bar{T} : es la temperatura media de la mezcla de gases en $^{\circ}K$;

S_i : es la constante de Sutherland del gas i ;

C_{pi} : calor específico a presión constante del gas i ; y

C_{vi} : calor específico a volúmen constante del gas i .

b) Para el espacio gaseoso entre la pastilla y la vaina, en cambio, suponemos que la conductividad de la mezcla sigue la siguiente ley de composición, válida para láminas gaseosas muy delgadas [12] :

$$K'_g = \prod_{i=1}^N k_i^{C_i} \quad (\text{II -3})$$

Este valor de la conductividad de la mezcla es el que debe ponerse en el numerador de (6).

APENDICE III

DISTANCIAS DE EXTRAPOLACION EN LAS SUPERFICIES DEL ESPACIO GASEOSO ENTRE LA PASTILLA Y LA VAINA.

El término ϵ de (6) está dado por:

$$\epsilon = 3.75 \frac{2 - 0.827 \bar{\alpha}}{\bar{\alpha}} l_m \text{ |cm|} \quad (\text{III-1})$$

donde:

$\bar{\alpha}$: es el coeficiente medio de acomodación para la mezcla de gases, y

l_m : es el camino libre medio de la mezcla de gases a la temperatura T y presión p.

El primero de estos parámetros se calcula a su vez a partir de los correspondientes a cada uno de los componentes de la mezcla:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{C_i \alpha_i}{\sqrt{M_i}}}{\sum_{i=1}^N \frac{C_i}{\sqrt{M_i}}} \quad (\text{III-2})$$

donde:

N: es el número de gases componentes;

C_i : es la concentración molar del gas i $\left(\sum_{i=1}^N C_i = 1 \right)$;

M_i : es el peso molecular del gas i; y

$$\alpha_i = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\alpha_{i1}} + \frac{1}{\alpha_{i2}} \right) \right]^{-1},$$

siendo α_{i1} y α_{i2} los coeficientes de acomodación del gas i en ambas superficies.

El segundo de los parámetros de (III-1), por su parte, debe reducirse a condiciones normales según la expresión:

$$l_m = \frac{l_m^0}{p} \frac{1 + S/273}{1 + S/\bar{T}} \cdot \frac{\bar{T}}{273} \quad (\text{III-3})$$

donde:

p : es la presión, en bar;

\bar{T} : es la temperatura media de la mezcla de gases, en °K;

S : es la constante de Sutherland de la mezcla de gases, promedio de las constantes de Sutherland (en °K) S_i de cada uno de los gases, pesado con sus respectivas concentraciones molares:

$$S = \sum_{i=1}^N C_i S_i, \quad y$$

l_m° : camino libre medio de la mezcla de gases a 0°C y una presión de 1 bar, promedio de los que corresponden a cada gas de la misma manera:

$$l_m^\circ = \sum_{i=1}^N C_i l_{m,i}^\circ$$

Todas las constantes para cada gas que aquí aparecen están en la TABLA I.

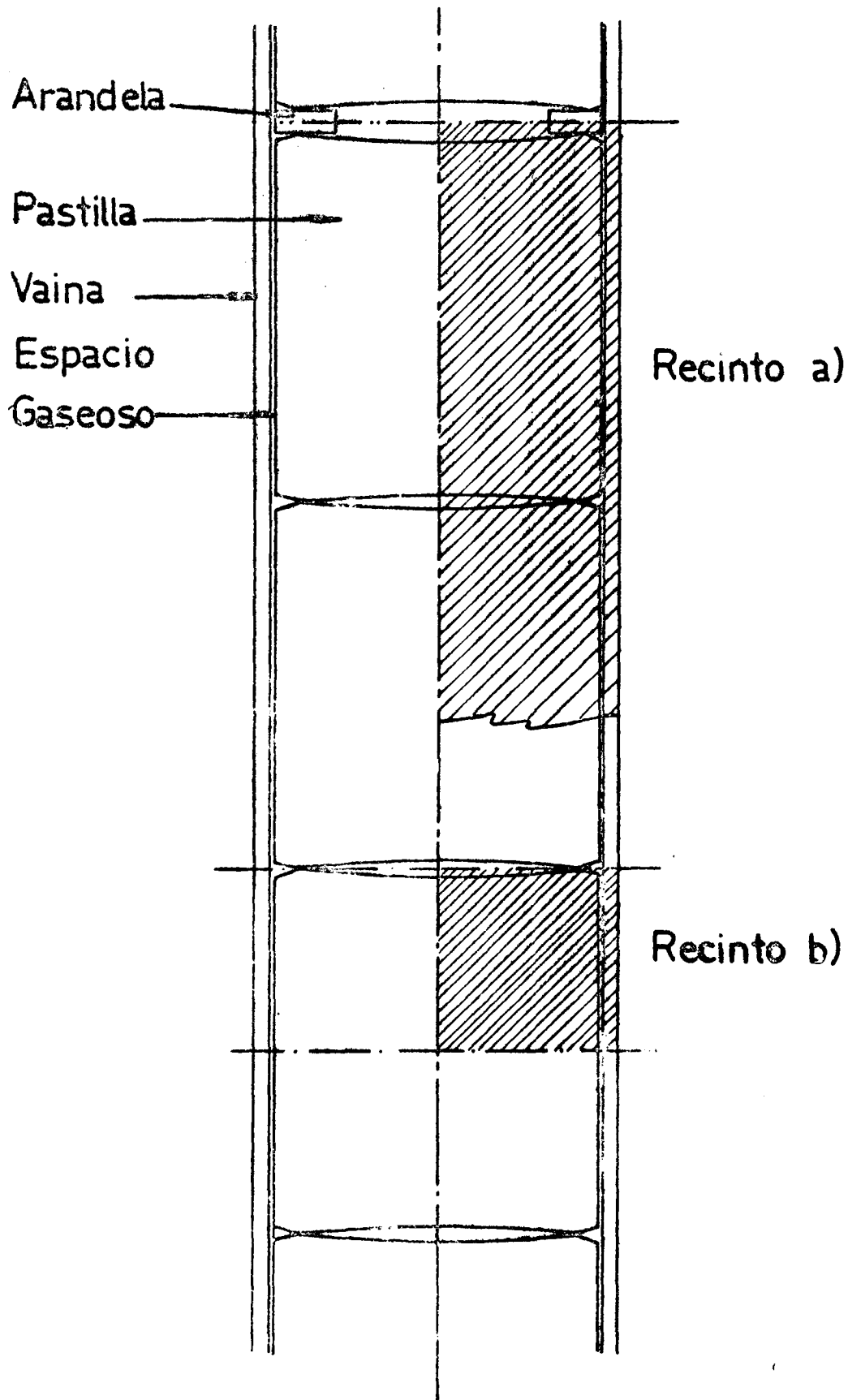
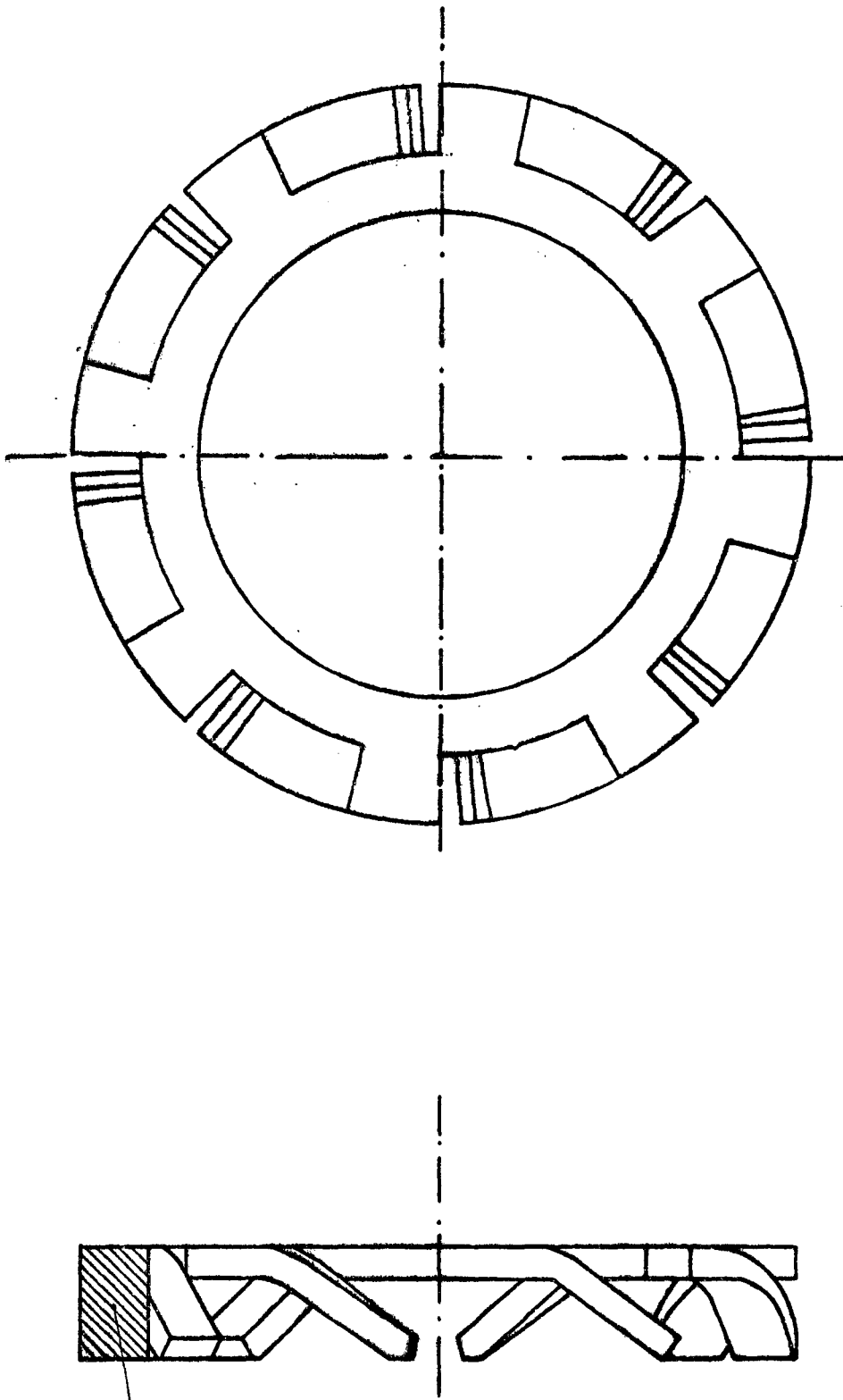


Figura 1. Sección longitudinal de una barra combustible C.N.A. mostrando una de las arandelas de dilatación. —



Esquematzacion a los
fines del calculo

FIGURA 2.- Arandelas de dilatacion de las barras
combustibles C.N.A.

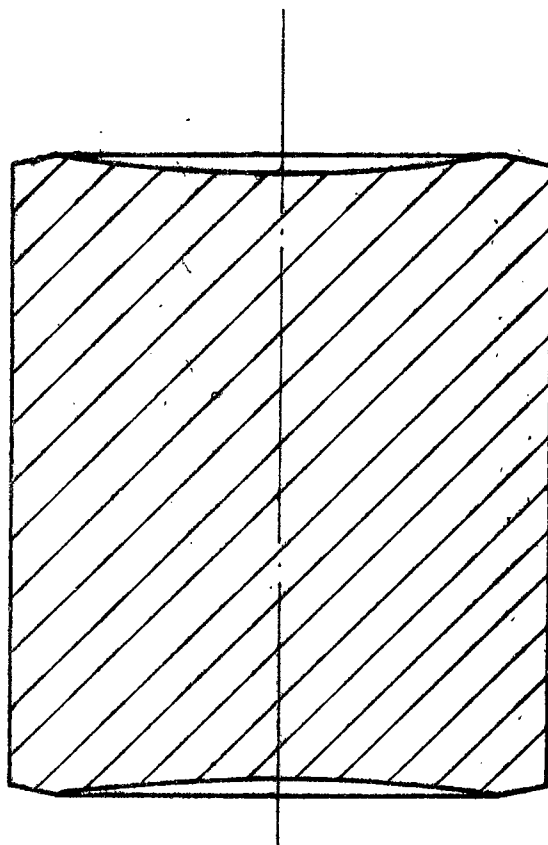
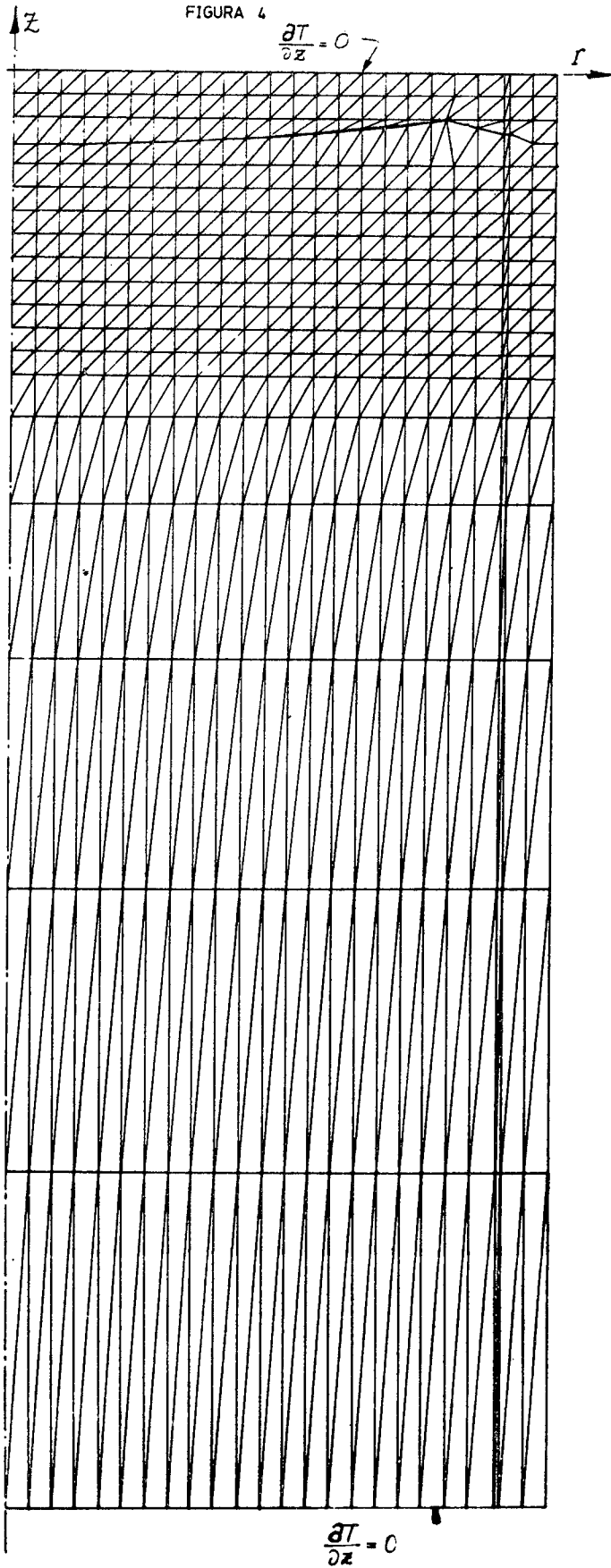


Figura 3._ Pastilla de los elementos combustibles de la C.N.A.

FIGURA 4



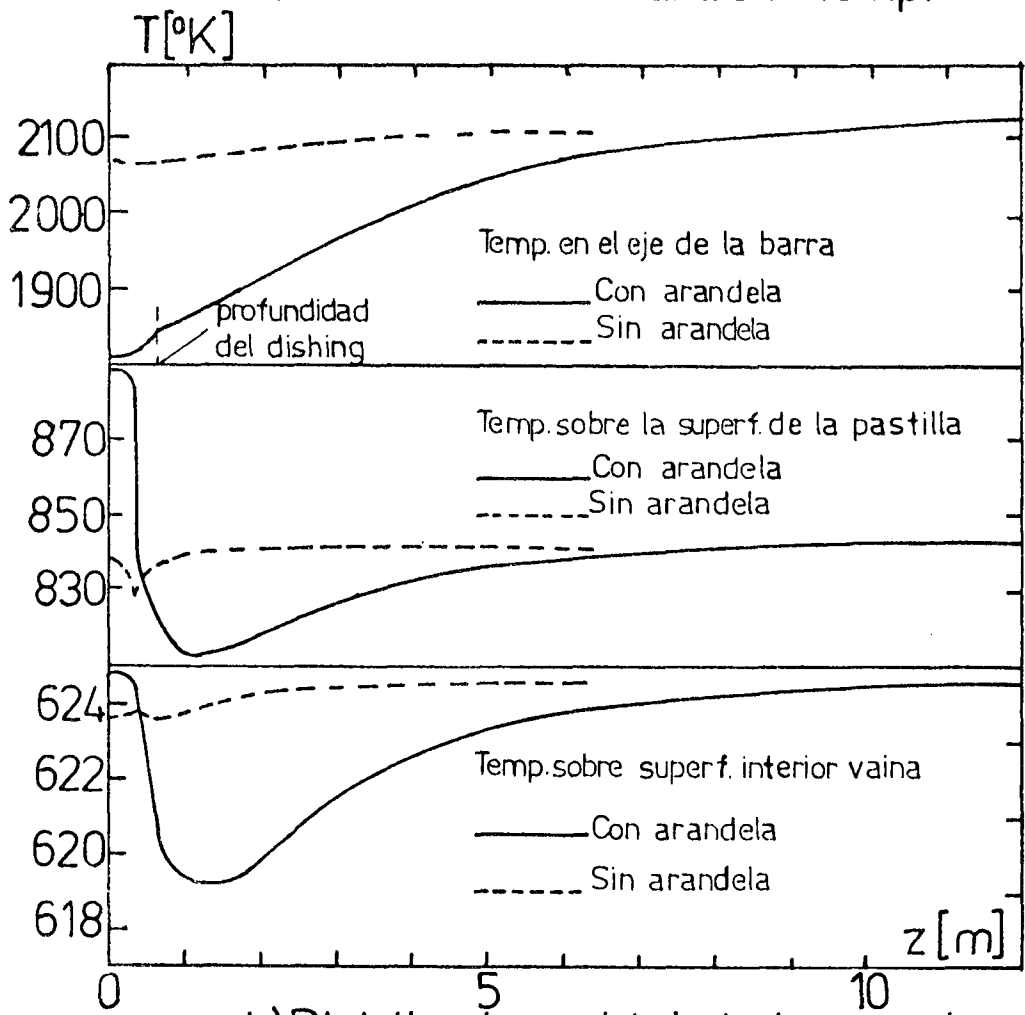
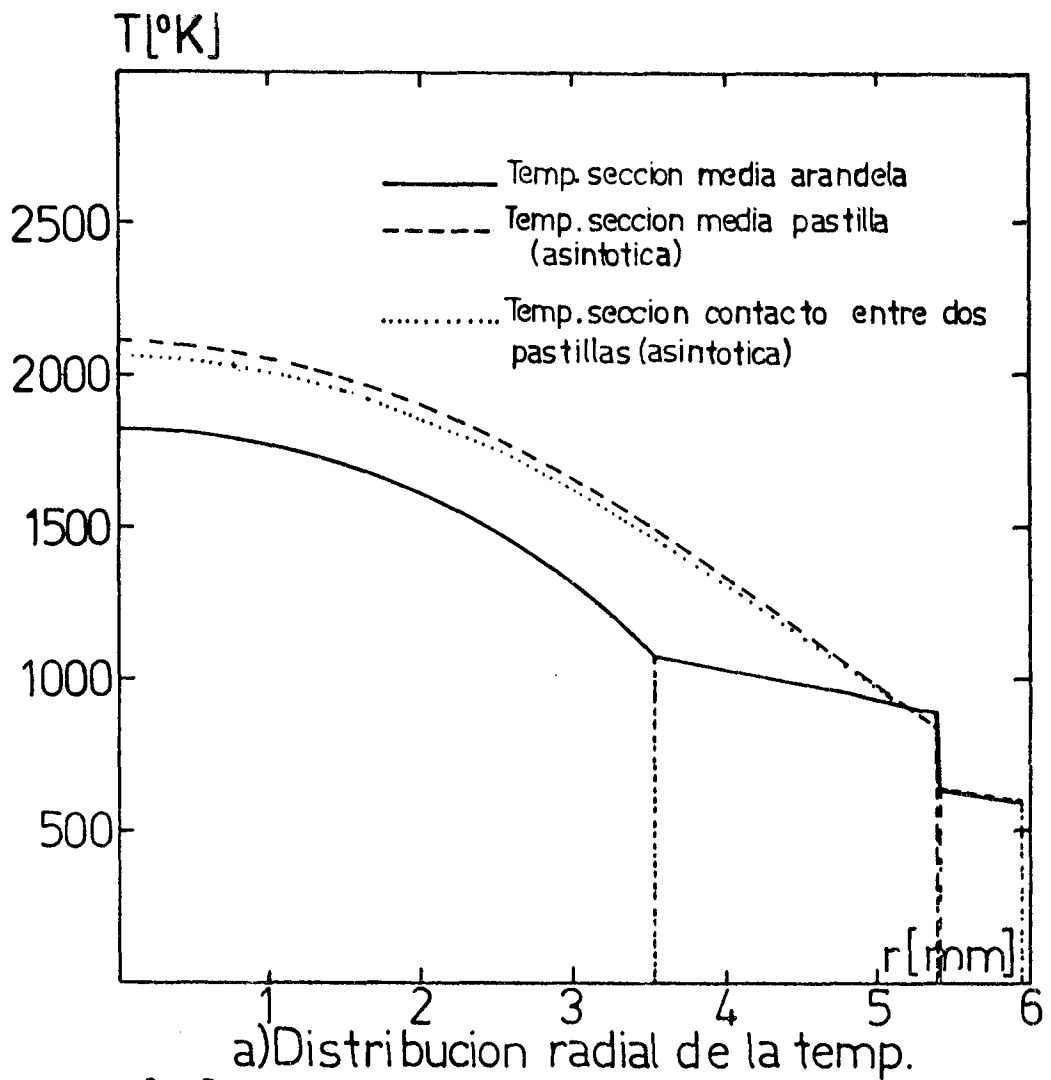
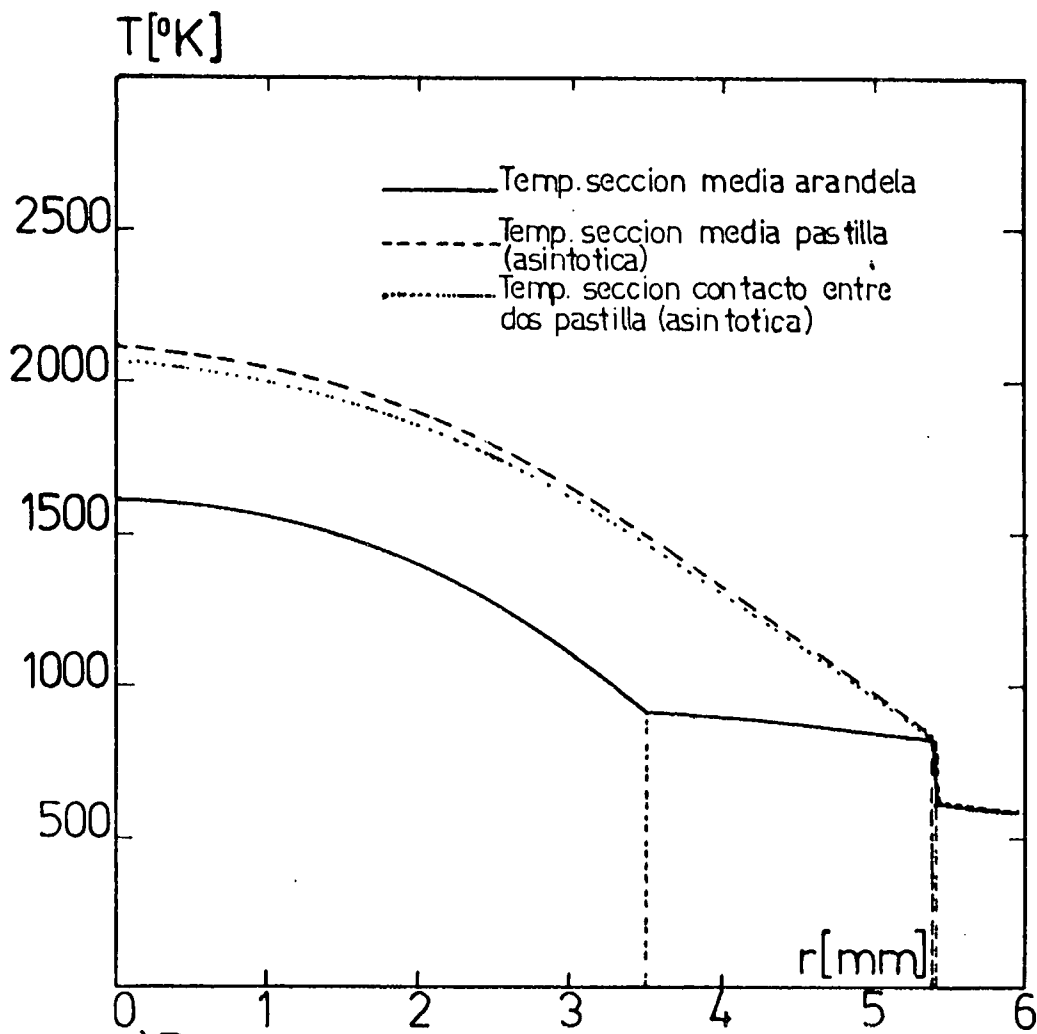
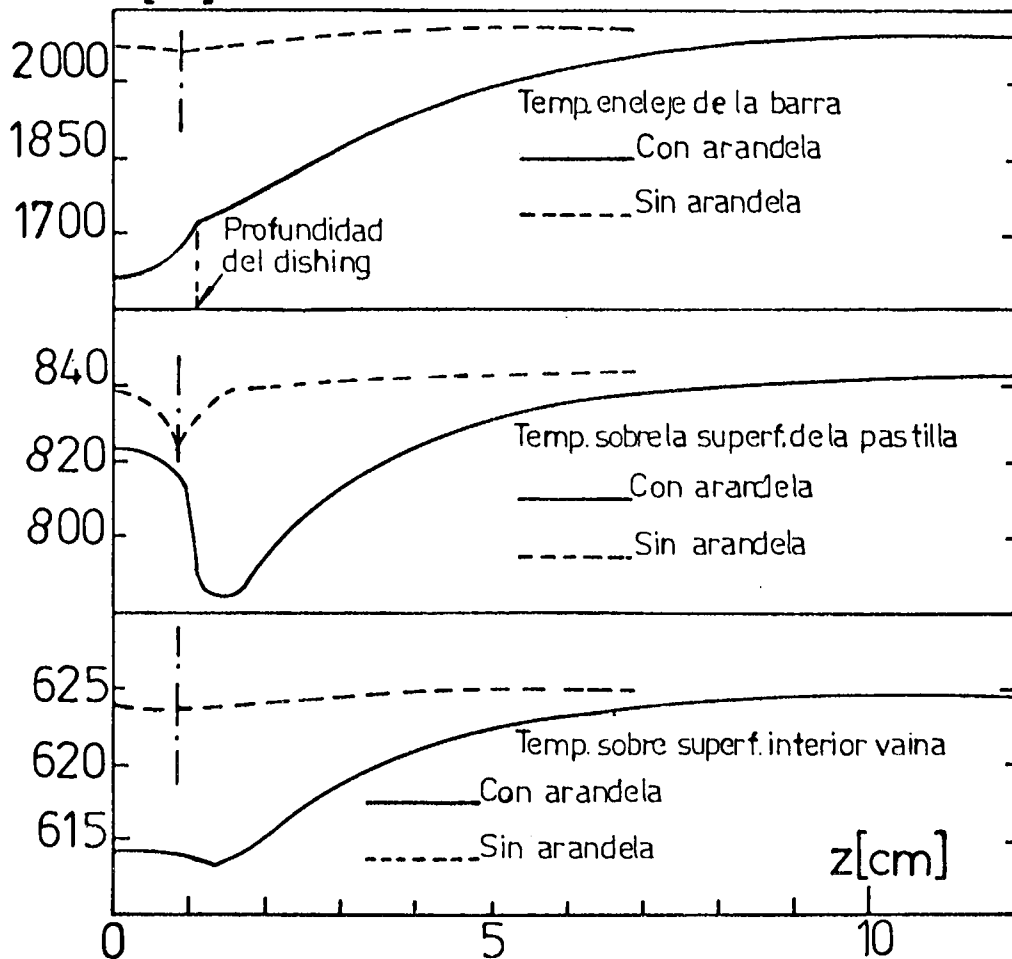


Figura 5. Resultados para la situacion I.

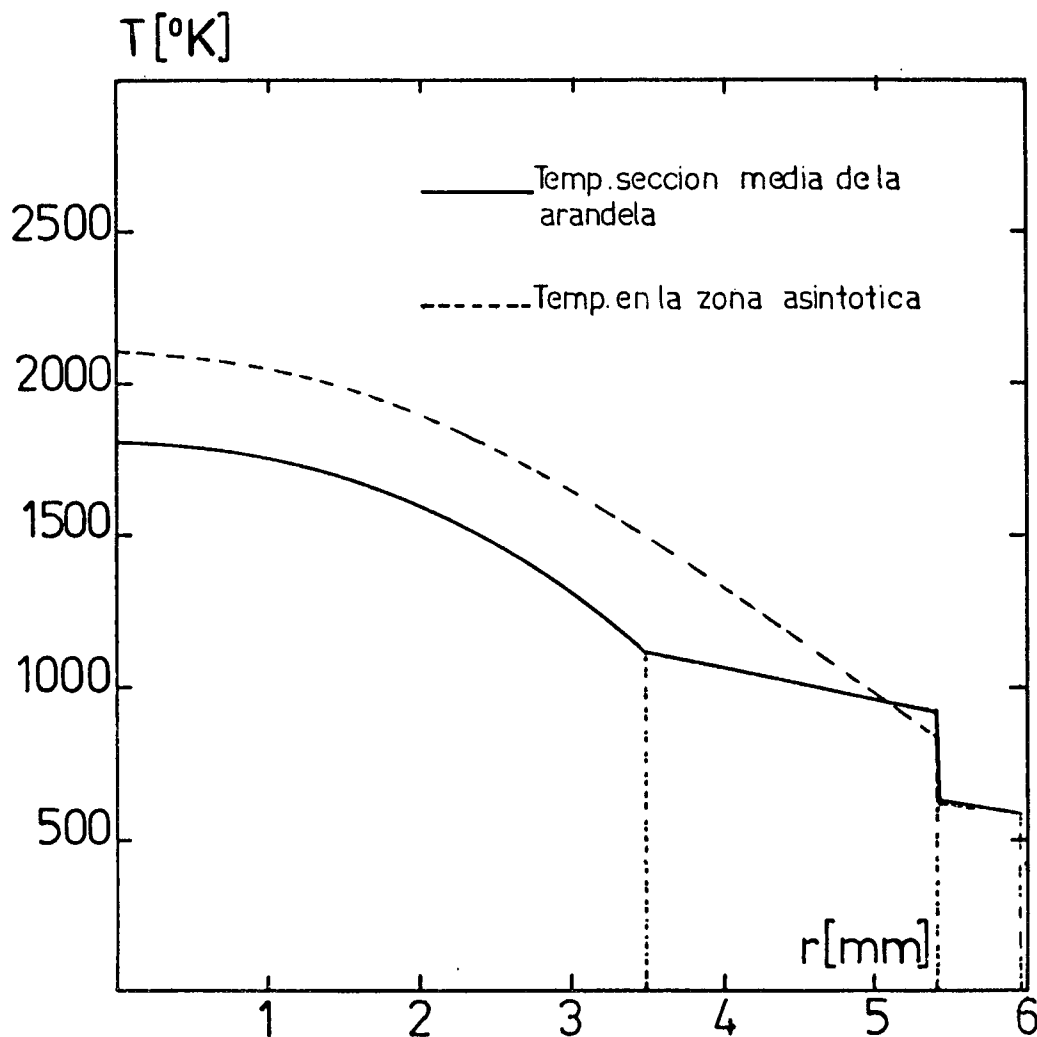


a) Distribucion radial de la temperatura
 T [°K]

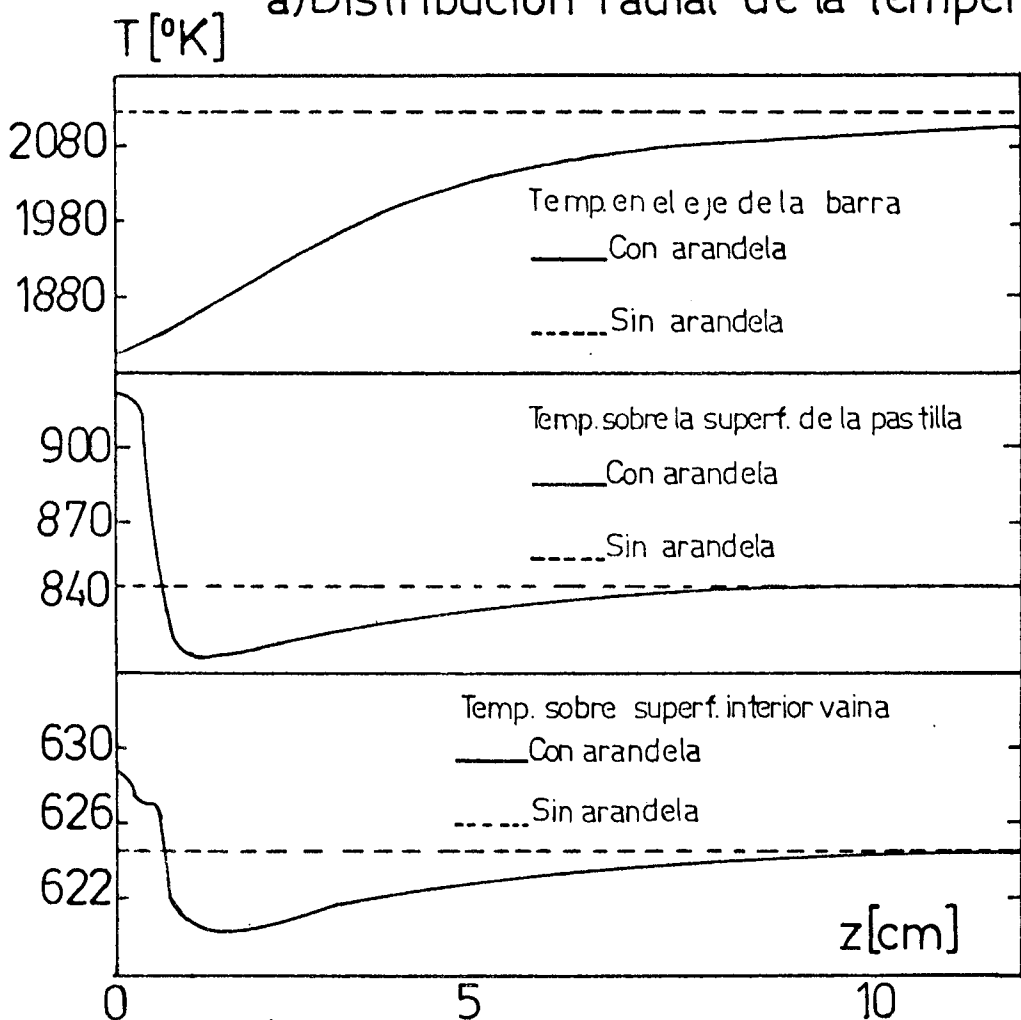


b) Distribucion axial de la temperatura

Figura 6. Resultados para la situacion II.

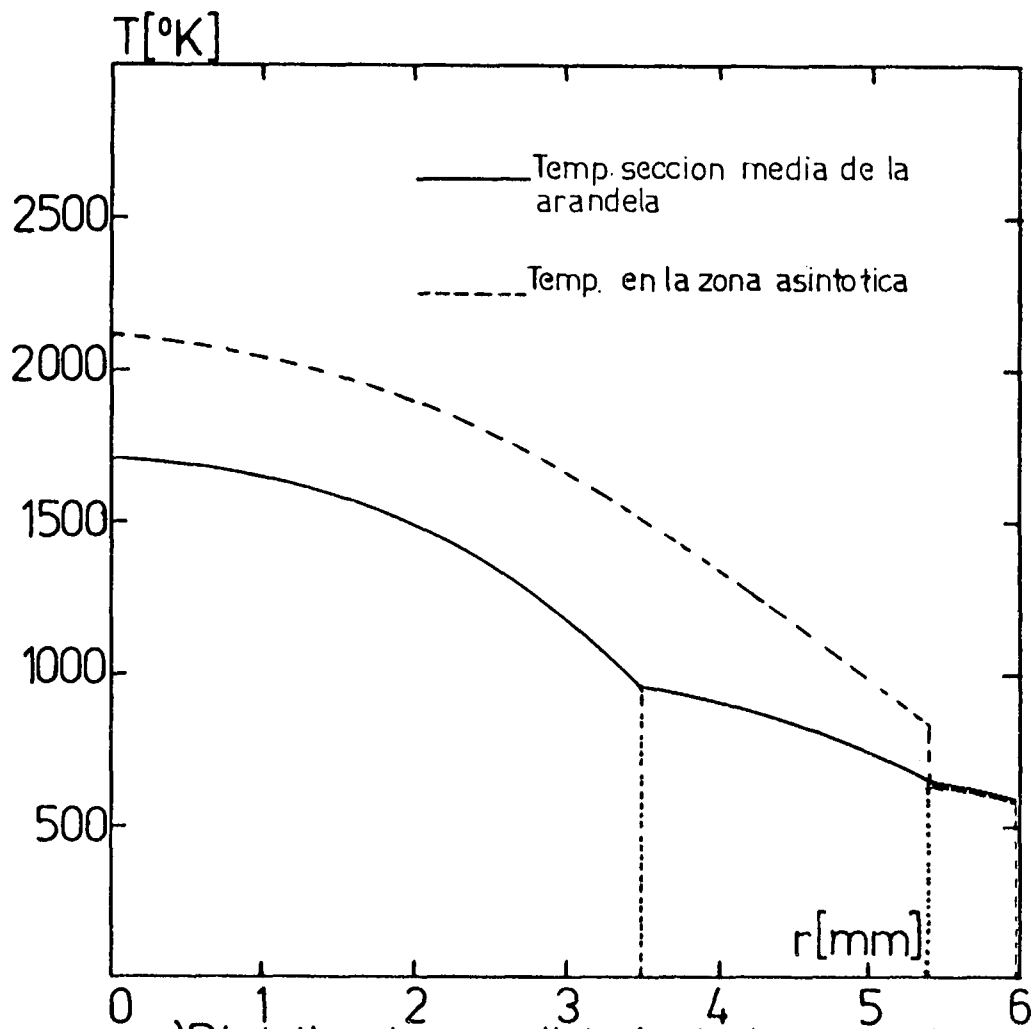


a) Distribucion radial de la temperatura

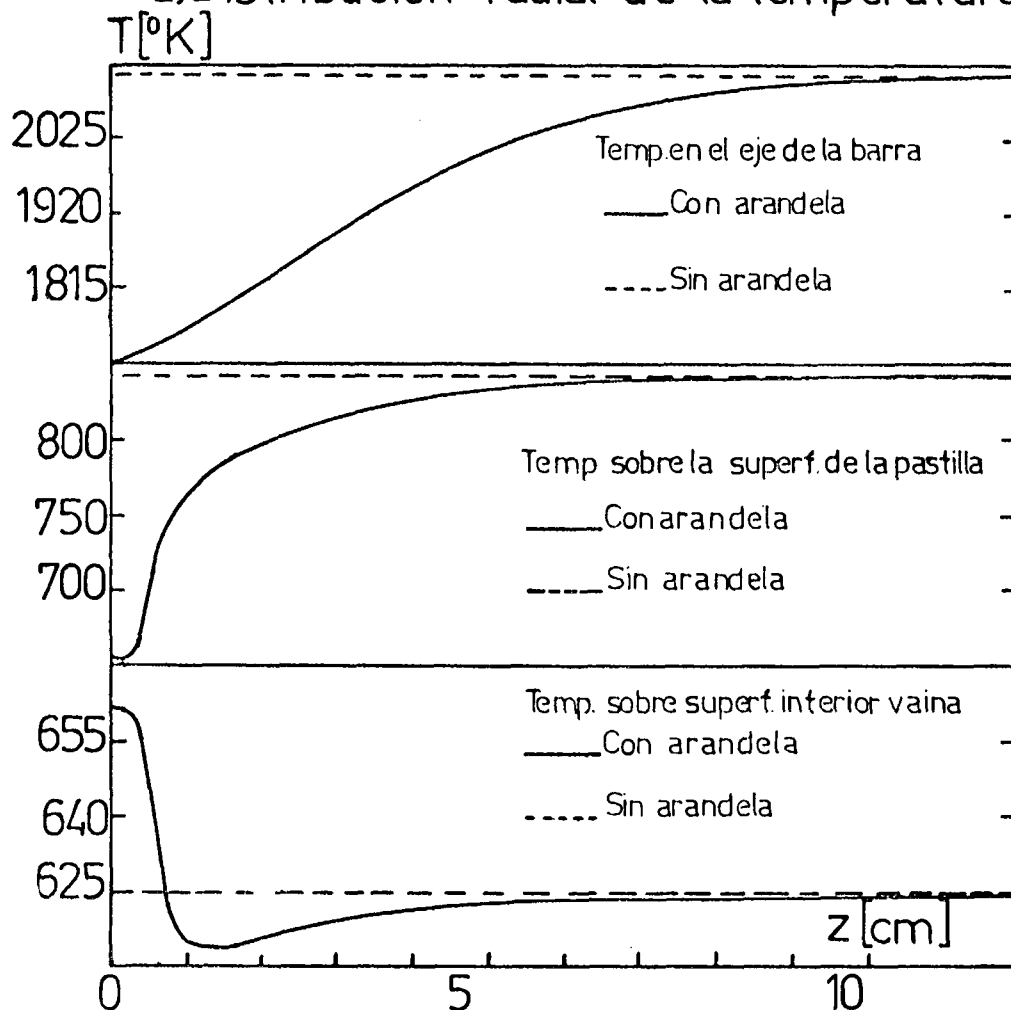


b) Distribucion axial de la temperatura

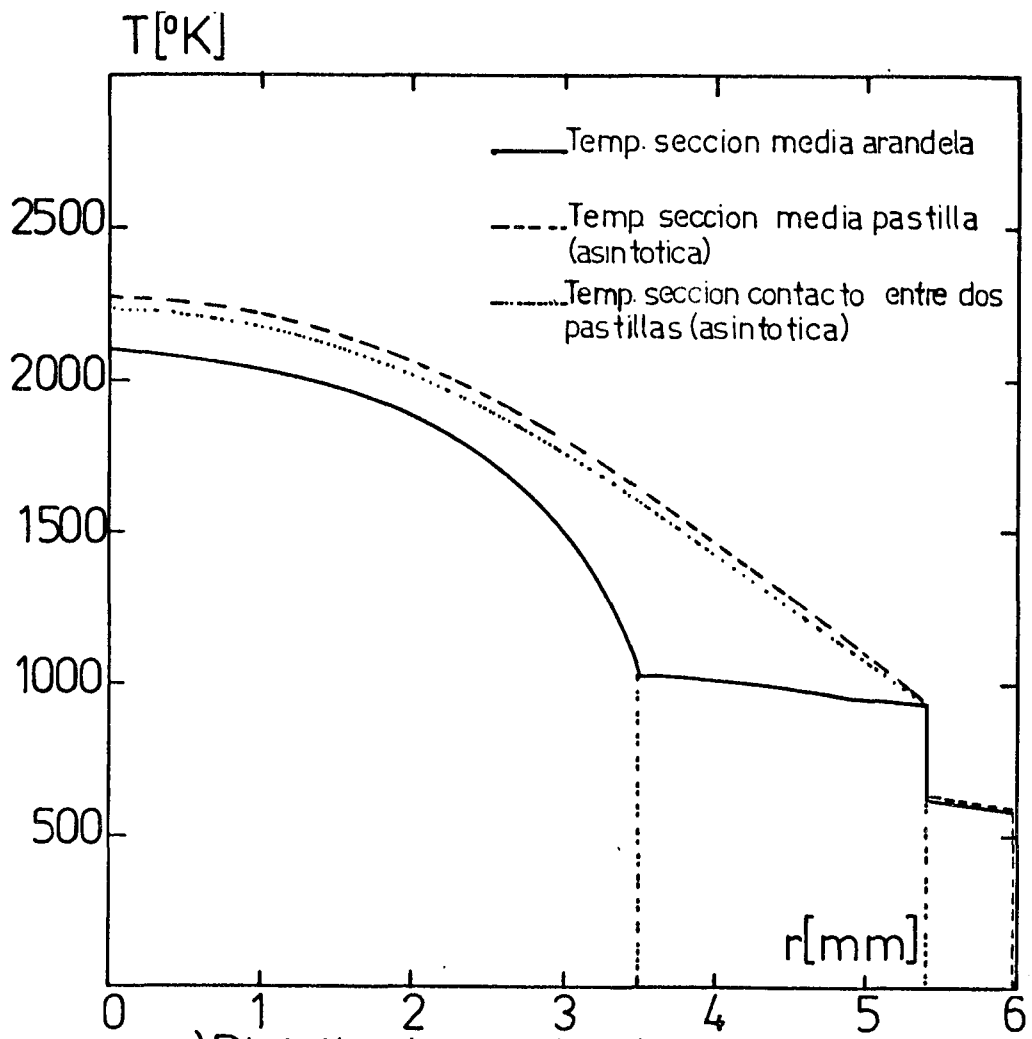
Figura 7. Resultados para la situacion III



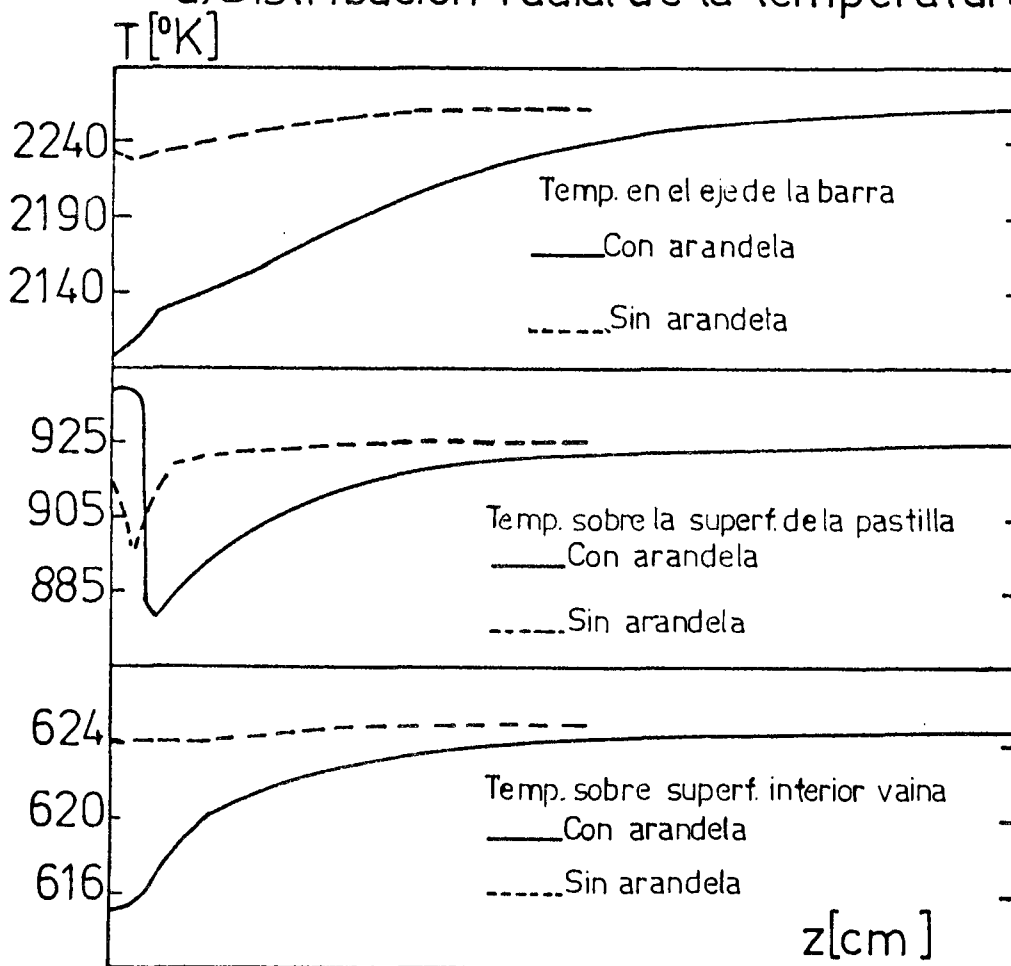
a) Distribucion radial de la temperatura



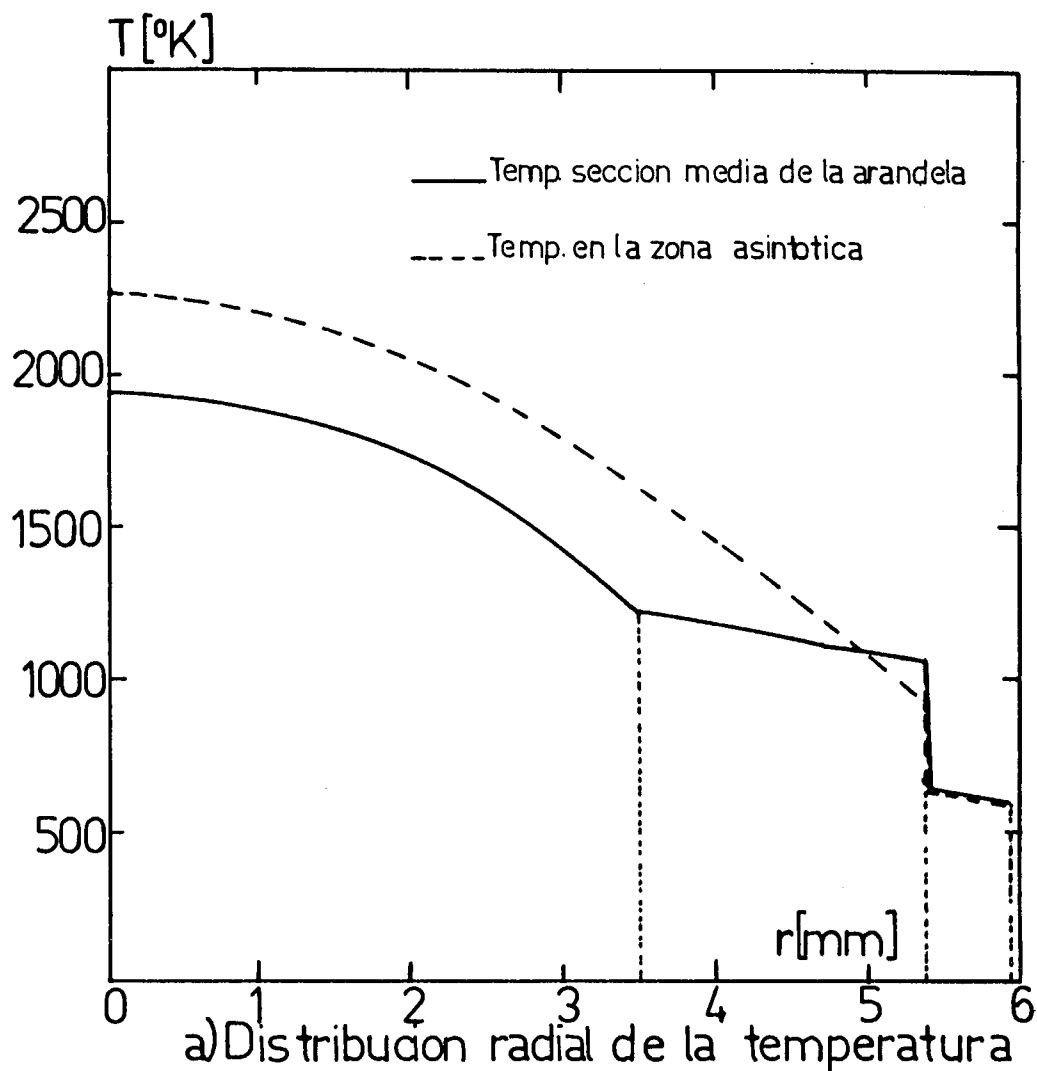
b) Distribucion axial de la temperatura
 Figura 8. Resultados para la situacion IV



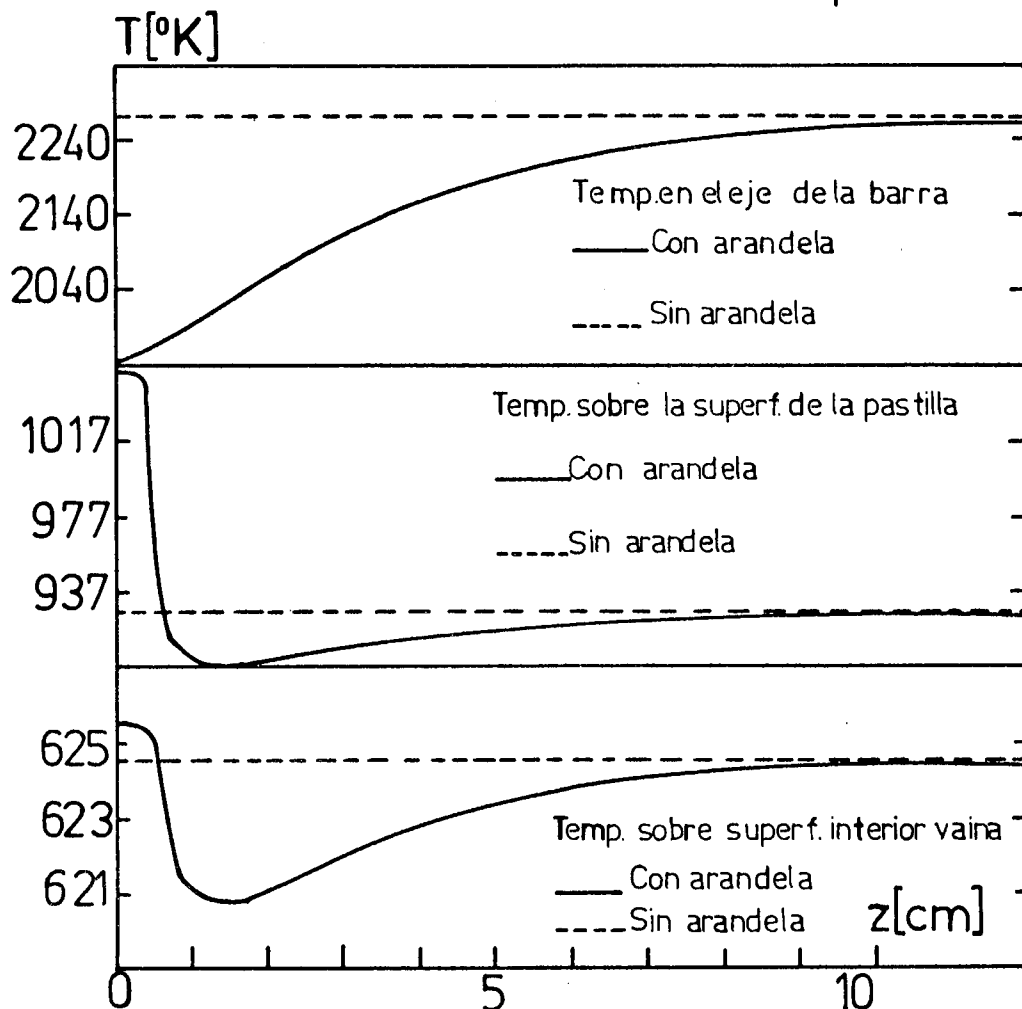
a) Distribucion radial de la temperatura



b) Distribucion axial de la temperatura
 Figura 9. - Resultados para la situacion V.

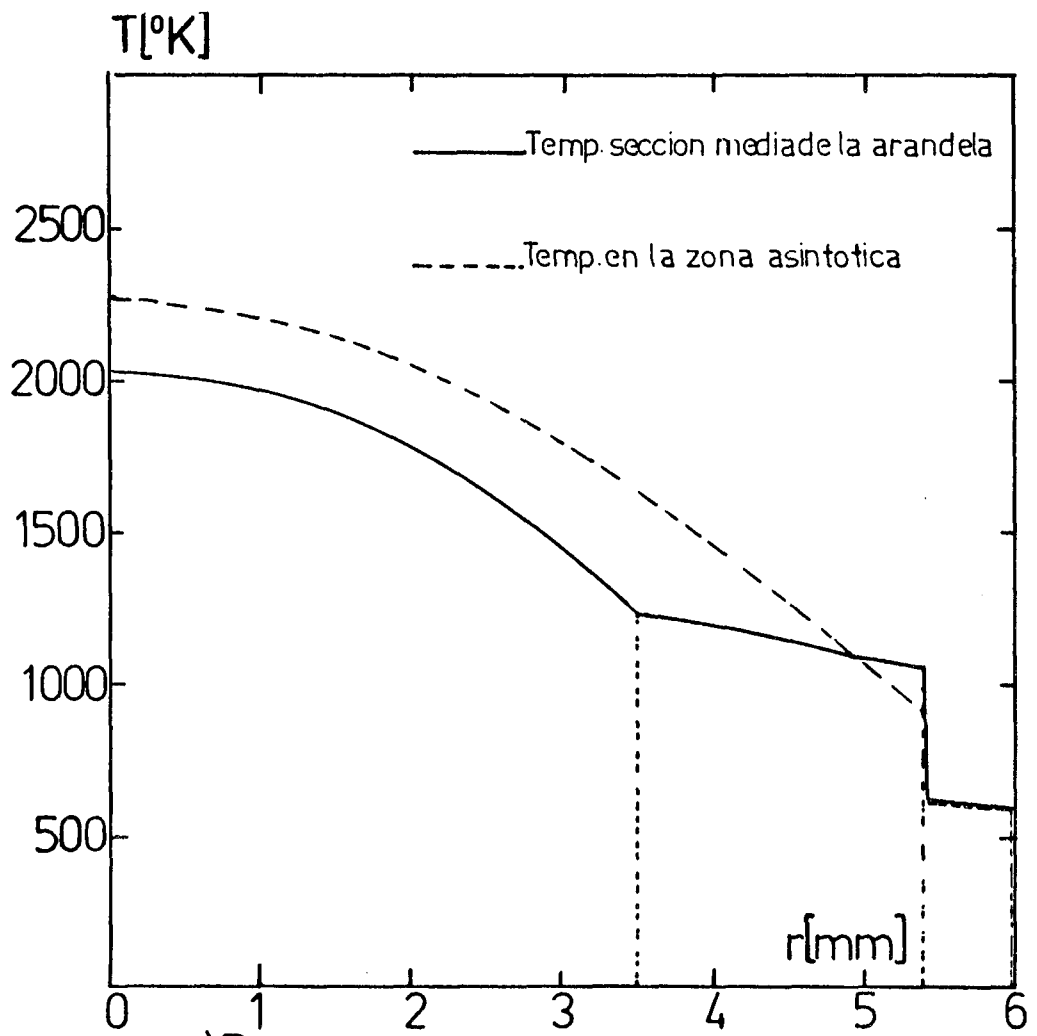


a) Distribucion radial de la temperatura

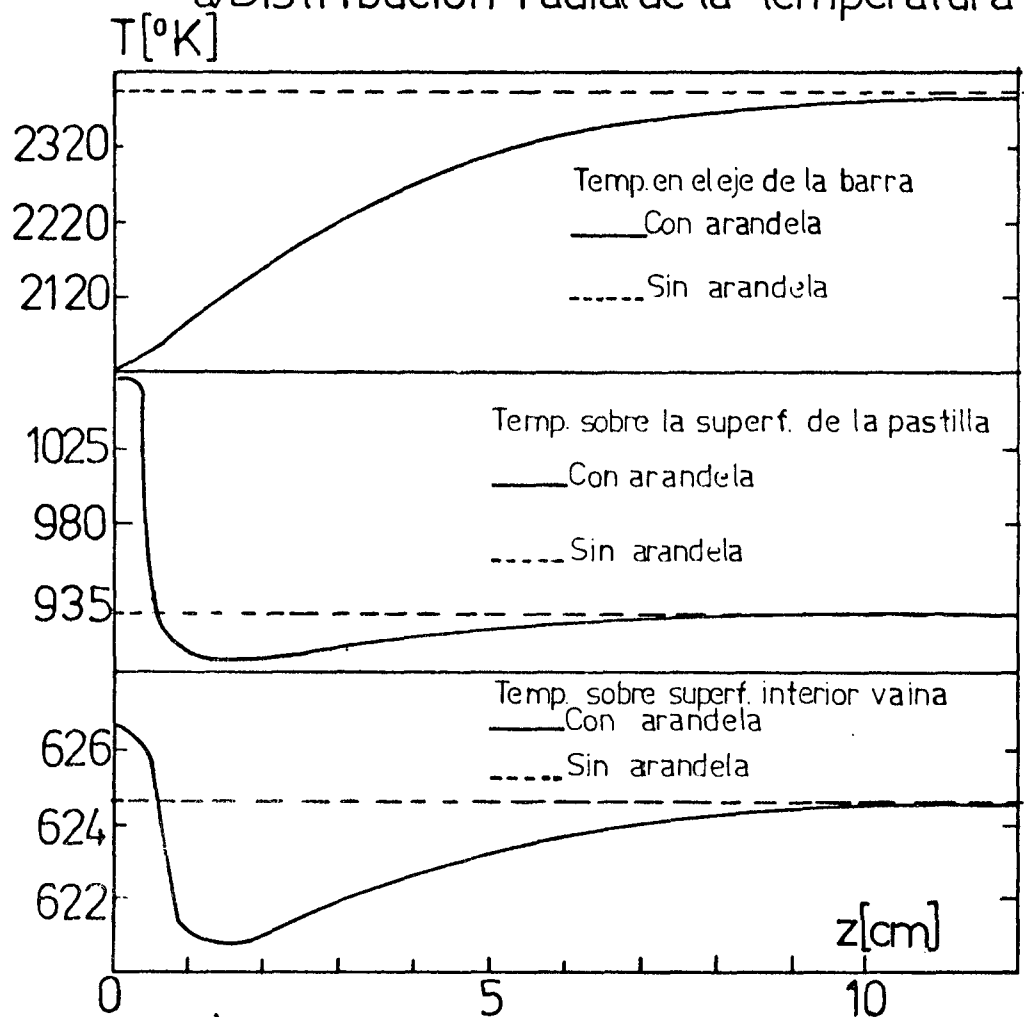


b) Distribucion axial de la temperatura

Figura 10.-Resultados para la situacion VI

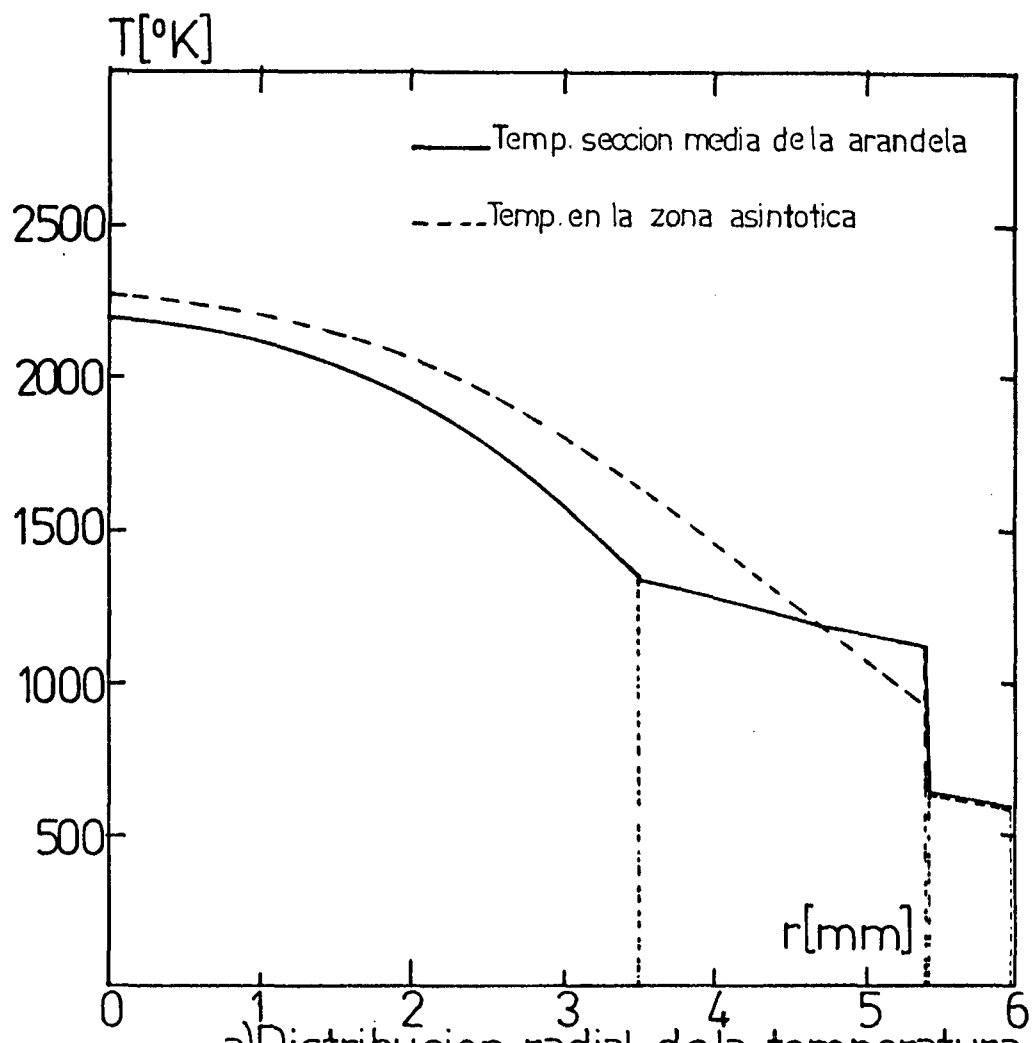


a) Distribucion radial de la temperatura

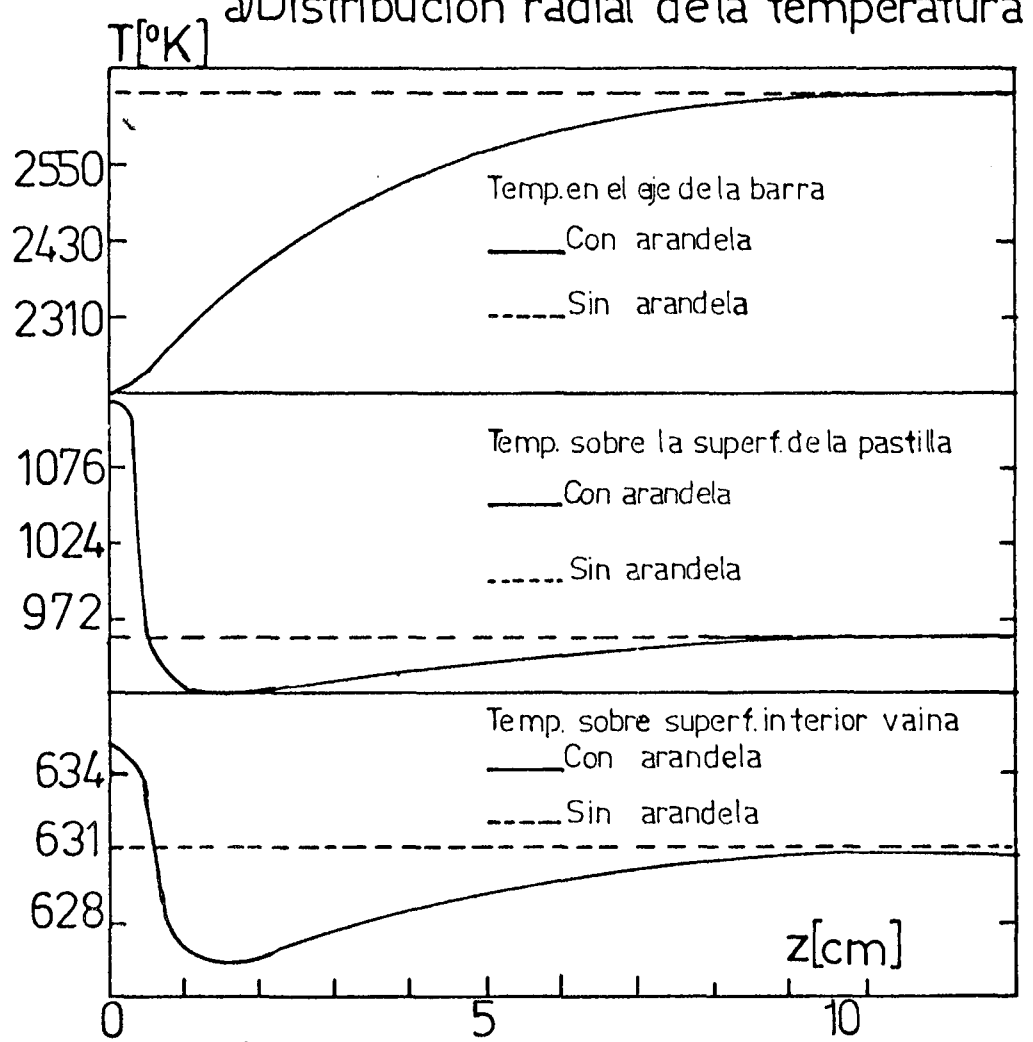


b) Distribucion axial de la temperatura

Figura 11. Resultados para la situacion VII

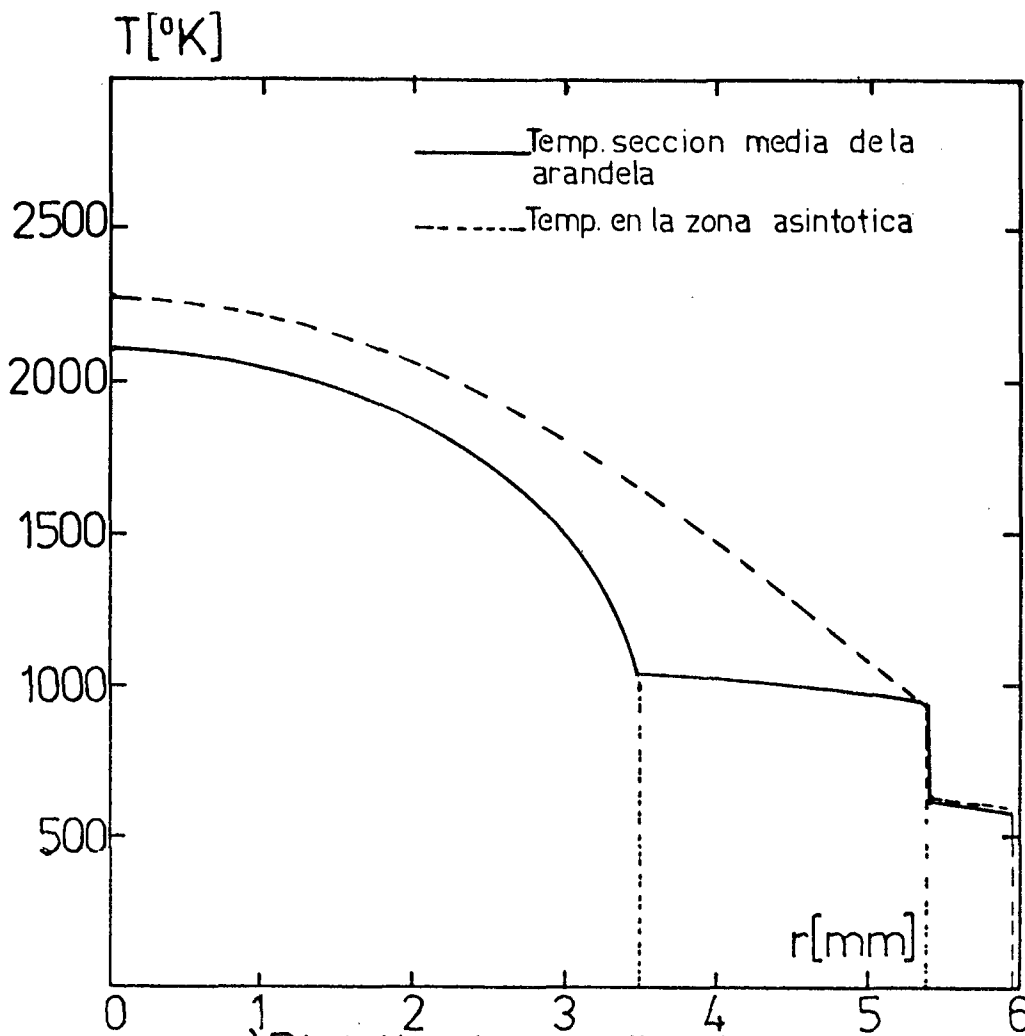


a) Distribucion radial de la temperatura

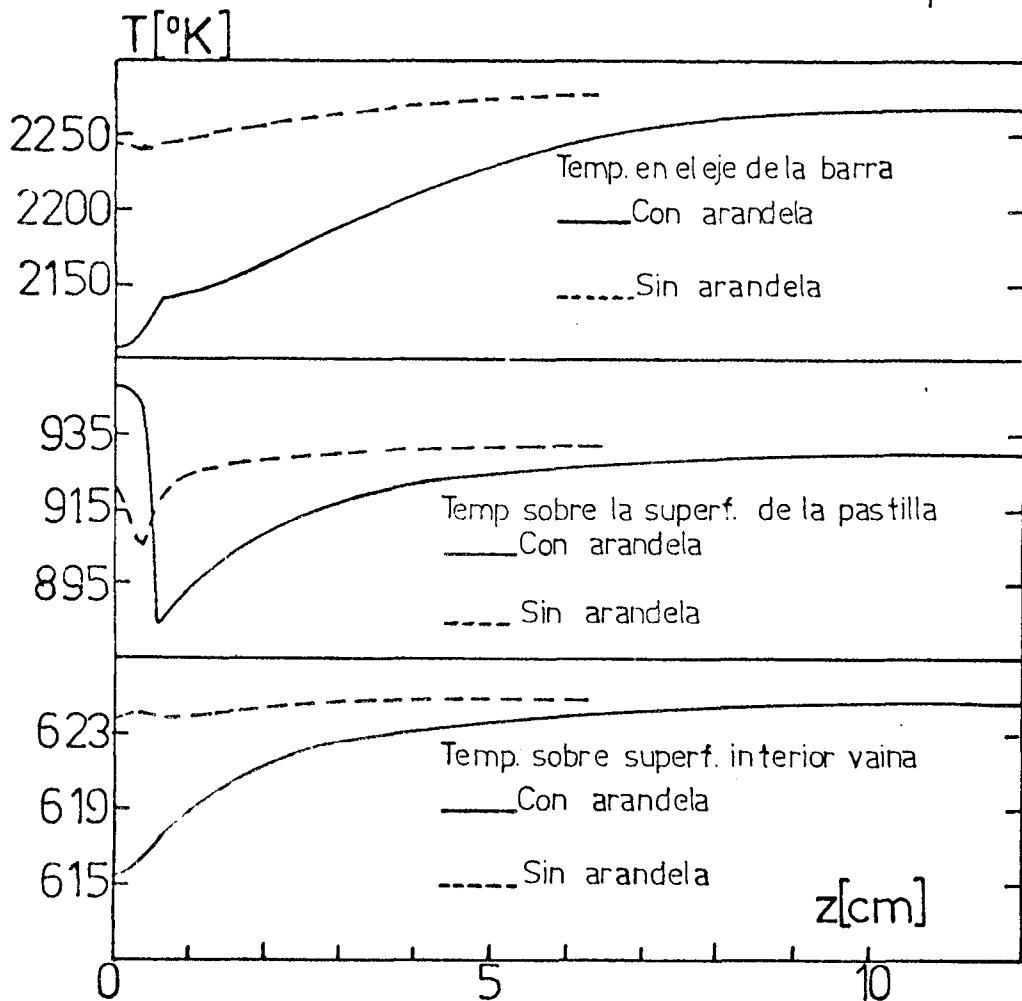


b) Distribucion axial de la temperatura

Figura 12. Resultados para la situacion VII

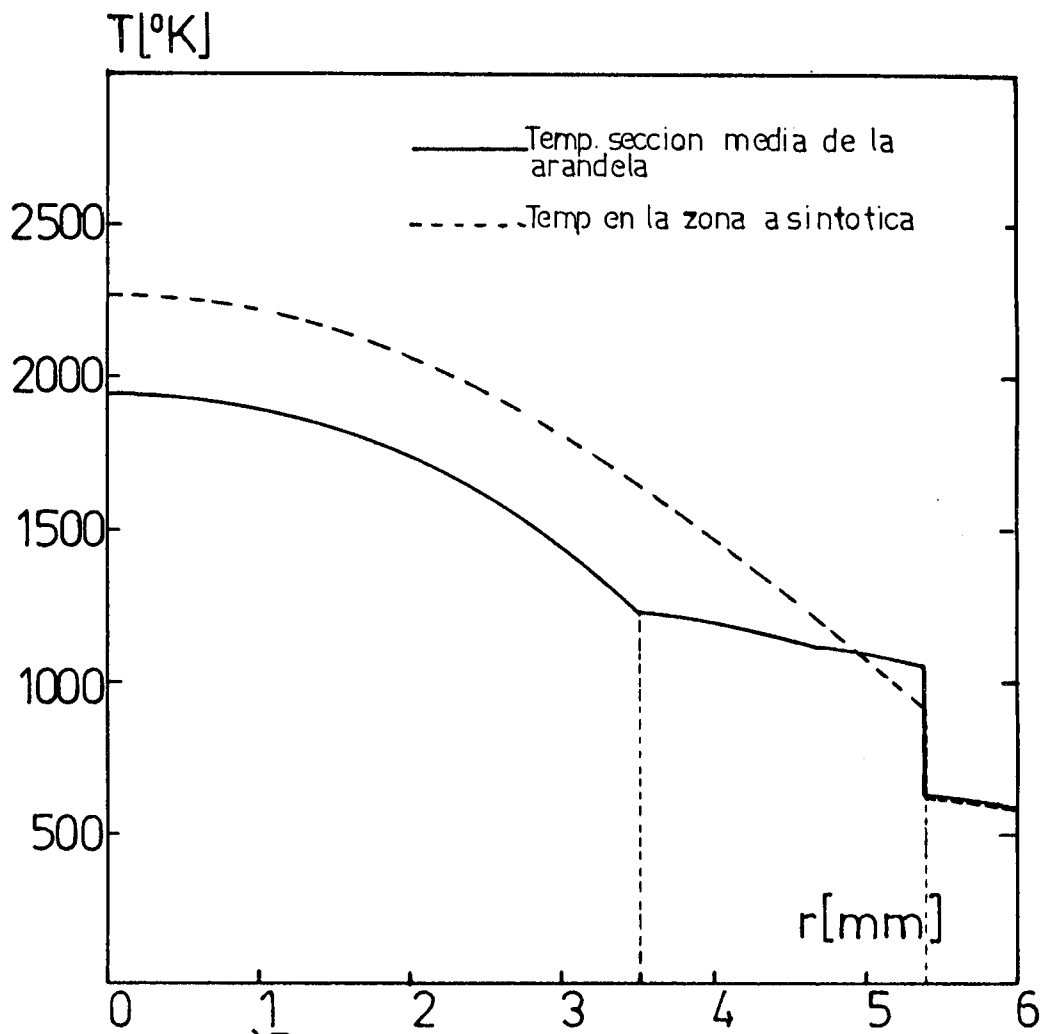


a) Distribucion radial de la temperatura

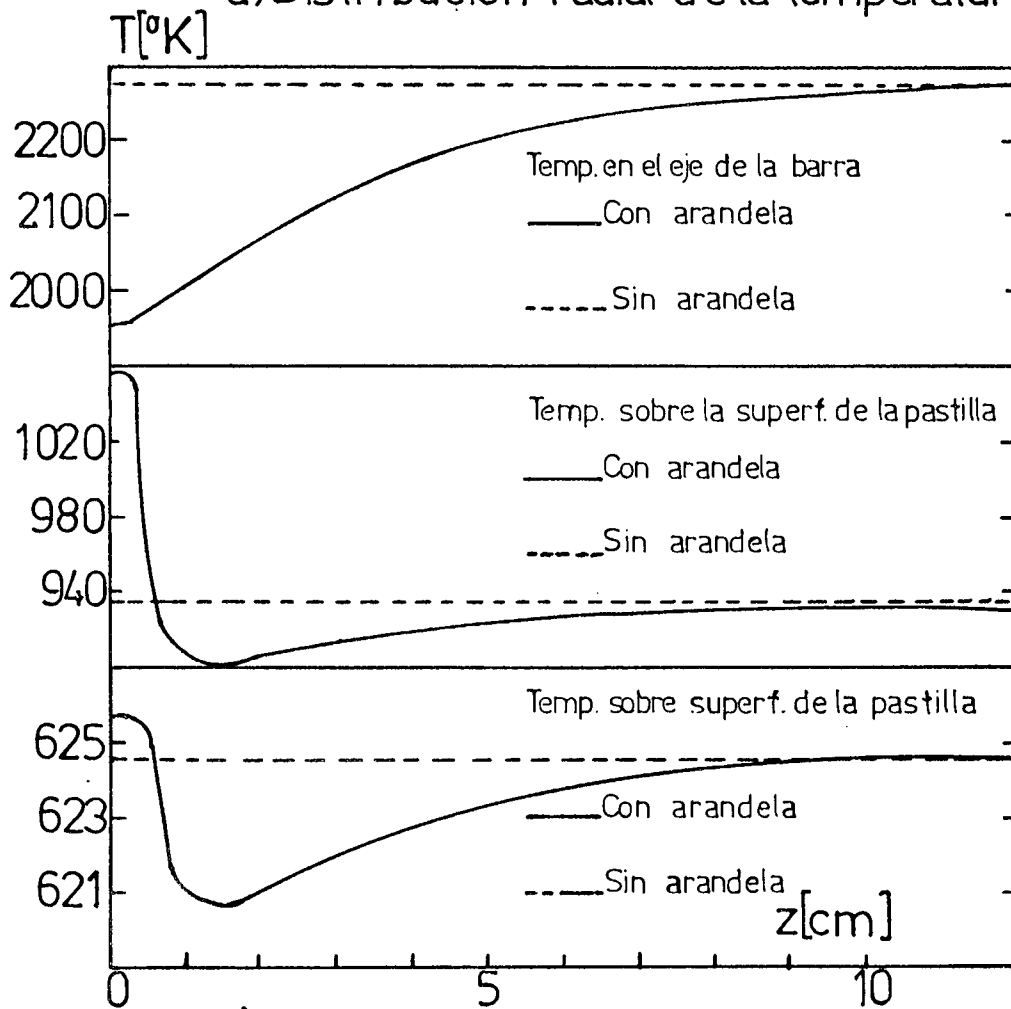


b) Distribucion axial de la temperatura

Figura 13. - Resultados para la situacion IX.



a) Distribución radial de la temperatura



b) Distribución axial de la temperatura

Figura 14. Resultados para la situación \bar{X}

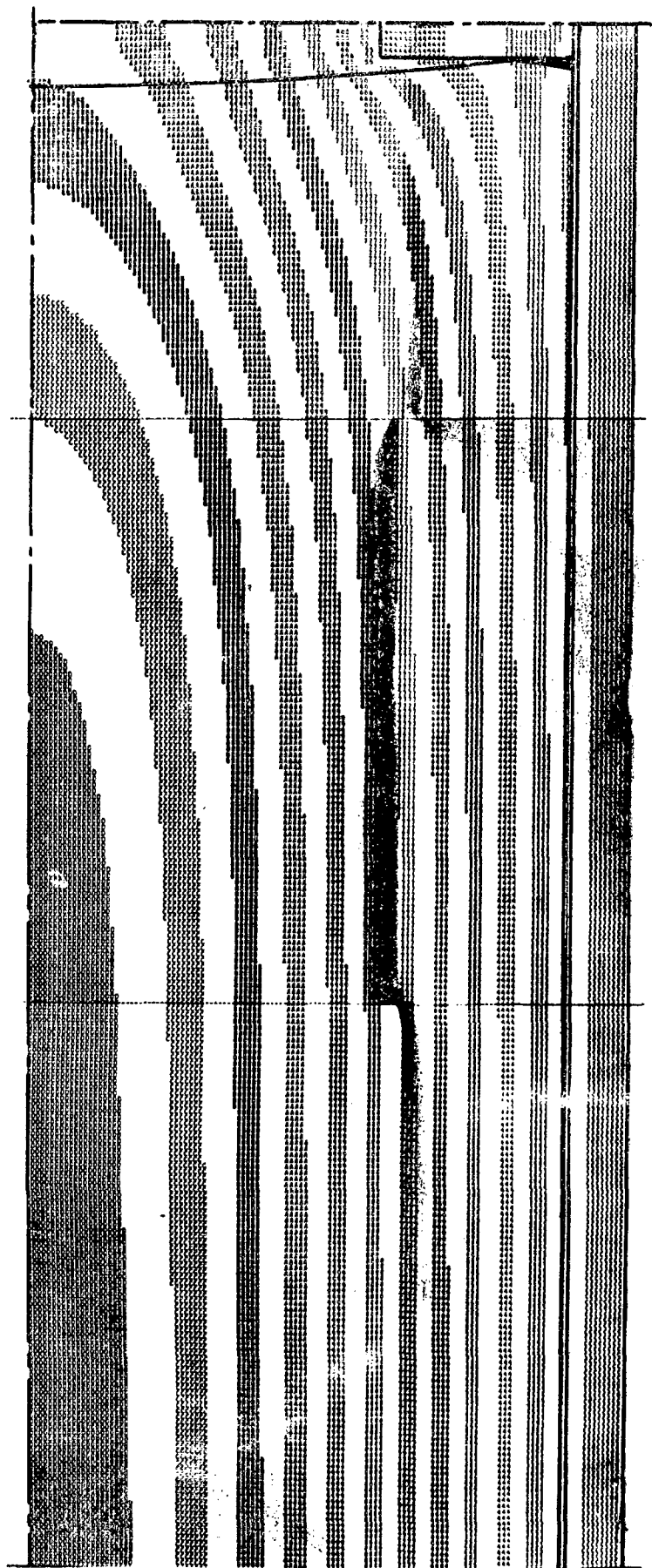


FIGURA 15: Salida gráfica del Código NOLICUARM: mapa de isotermas para la situación I.