

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
NO 2	NO 1971

08.71.05

TE. 5/55

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

CALCULO DE LA DISTRIBUCION DE TEMPERATURA EN BARRAS
COMBUSTIBLES (METODO ANALITICO-GRAFICO)

C. MONTENERO

Departamento de Combustibles Nucleares
1971

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

CALCULO DE LA DISTRIBUCION DE TEMPERATURA EN BARRAS
COMBUSTIBLES (METODO ANALITICO-GRAFICO)

C. MONTENERO

Departamento de Combustibles Nucleares
1971

SUMARIO

- 1.- Introducción
- 2.- Método de Cálculo
 - 2.1.- Cálculo de la temperatura interior de la vaina.
 - 2.2.- Cálculo de los diámetros dilatados de la vaina.
 - 2.3.- Cálculo de la temperatura superficial y del diámetro dilatado de la pastilla de UO_2 .
 - 2.4.- Cálculo de la temperatura del centro de la pastilla de UO_2
 - 2.5.- Cálculo de la temperatura del borde del dishing.
- 3.- Resultados
- 4.- Conclusiones
- 5.- Recomendaciones
- 6.- Datos y constantes utilizados
- 7.- Bibliografía

1-INTRODUCCION

En una barra combustible bajo condiciones de disipación de potencia, los fenómenos asociados a la misma tales como: dilataciones, tensiones, producción de gases de fisión presiones internas, etc. están gobernados por la distribución de temperatura dentro de dicha barra.

Por ello tanto para el diseño como para predecir el comportamiento bajo irradiación de las barras combustibles es de suma importancia conocer esa distribución de temperatura con la mayor exactitud posible. (1).

La necesidad de disponer datos de temperatura en forma rápida, dió lugar al programa de cálculo que se expone en este trabajo, el cual da resultados suficientemente exactos, para el caso de barras combustibles cuyas potencias lineales específicas no superen los 400 W/cm, en las cuales se mantenga un espacio gaseoso durante servicio entre pastillas combustibles-vaina y para temperaturas máximas en la superficie de las pastillas de 250 °C.

El trabajo expone un método analítico-gráfico que se basa en el uso del graficador de la computadora de mesa Hewlett-Packard Mod. 9100 B, sin el cual la rapidez del mismo carece de significado.

Además, se comparan los resultados obtenidos con los que resultan del uso del código de cálculo PARK (2), que implica una aproximación más precisa al problema.

2- METODO DE CALCULO

Las barras combustibles que forman el prototipo Blanket PBC1 consisten en un núcleo central de pastillas sinterizadas cilíndricas de UO₂ natural envaina-

das en tubos de Aluminio. Entre las pastillas y la vaina queda un espacio libre (gap) que es llenado con gas Helio debido a la alta conductividad térmica del mismo. Estas barras tienen una longitud activa media de 62,5 cm y llevan soldados en sus extremos tapones del mismo material de la vaina.

La distribución de potencias a lo largo de dichas barras sigue una ley consensada, pero a los fines del cálculo se toman tramos de longitud lo suficientemente pequeños como para considerar q' (W/cm) constante en esos tramos.

Se trata entonces de determinar cómo varía la temperatura en las zonas de la barra (combustible, gap, vaina). Para ello se supone una distribución de flujo neutrónico radial uniforme y no se consideró la conducción longitudinal.

Como en la actualidad no están todavía totalmente definidas las condiciones de potencia a que va a estar sometido el Blanket, se estudió genéricamente el problema obteniéndose la variación de los diferentes parámetros en función de la potencia lineal q' , tomando valores de la misma que cubre el rango hasta los valores de 600W/cm; siendo este último valor ya muy elevado para un elemento de las características del considerado (Atucha trabajará a un máximo de 575W/cm)

Se hicieron comprobaciones para seis condiciones diferentes, a saber:

- a) para temperatura exterior de vaina 80° C
- b) para temperatura exterior de vaina 120° C

A su vez cada uno de estos casos se analiza para tres tipos de "gap," en frío:

<u>Caso 1</u>	Gap mínimo	($D_{IO} = 1.045 \text{ cm}$: $D_{UO} = 1.041 \text{ cm}$)
<u>Caso 2</u>	Gap nominal	($D_{IO} = 1.047 \text{ cm}$: $D_{UO} = 1.040 \text{ cm}$)
<u>Caso 3</u>	Gap máximo	($D_{IO} = 1.049 \text{ cm}$: $D_{UO} = 1.037 \text{ cm}$)

La secuencia de cálculo es la siguiente:

2.1. Cálculo de la temperatura interior de la vaina

Se determina a partir de :

$$T_I = \frac{q'}{2 \pi \lambda_{Al}} \cdot \ln \frac{D_{EO}}{D_{IO}} + T_E \quad (1)$$

Tomanos $\lambda_{Al} = \text{cte.}$ e independiente de la temperatura, pues el gradiente de temperatura en la vaina es muy pequeño.

La (1) la podemos poner de esta otra forma:

$$\Delta T_V = T_I - T_E = \left(\frac{1}{2 \pi \lambda_{Al}} \cdot \ln \frac{D_{EO}}{D_{IO}} \right) q' \quad (2)$$

Se representó $\Delta T_V = f(q')$ en el gráfico 1, pudiéndose obtener así rápidamente el gradiente de temperatura en la vaina para los valores de q' pedidos. Con este valor y el correspondiente T_E determinamos directamente T_I por:

$$T_I = T_E + \Delta T_V \quad (3)$$

Calculamos ahora la temperatura media dentro de la vaina

$$\overline{T}_V = \frac{T_E + T_I}{2} \quad (4)$$

Dato que utilizaremos posteriormente para hallar la dilatación radial de dicha vaina.

Nota: Se hizo el cálculo solo para los diámetros nominales y fue aplicada a todos los otros casos, pues las variaciones que se obtenían eran de la centésima de grado y esta es imposible de observar con el método gráfico aquí empleado

2.2 Cálculo de los diámetros dilatados de la vaina.

A partir de los diámetros exterior e interior de la vaina medidos a una temperatura media de 20°C, se pueden obtener los diámetros dilatados de la misma por efecto de la temperatura, con

$$D_E = D_{E0} [1 + \alpha_{AR} (\bar{T}_V - 20)] \quad (5)$$

$$D_I = D_{I0} [1 + \alpha_{AR} (\bar{T}_V - 20)] \quad (6)$$

Una vez obtenidos estos diámetros habría que considerarlos como nuevos diámetros de partida, recalcular ΔT_V por (2) y repetir nuevamente el cálculo.

Se comprobó que haciendo este proceso iterativo, se obtenían diferencias de temperatura del orden de las centésimas, por lo que en este caso se descartó tal proceder.

Tampoco se calcularon los diámetros dilatados exteriores pues a los fines de este trabajo no aportaban datos necesarios.

Para obtener los correspondientes valores de D_I se hizo un programa para utilizar con la computadora de mesa. (Programa 1).

2.3. Cálculo de la temperatura de borde y del diámetro dilatado de la pastilla de UO_2

Se obtienen en un mismo paso la temperatura de borde y el diámetro dilatado de la pastilla, debido a que ambos parámetros están biunivocamente ligados entre sí.

Partiendo de la temperatura interior de la vaina se produce un salto de temperatura en el "gap" de gas que da una primera temperatura en el borde. Como consecuencia se tendría una cierta distribución de temperaturas dentro del combustible. Esta distribución determina la dilatación de la pastilla, produciéndose como consecuencia una disminución del espesor del "gap" y disminuye entonces el gradiente de temperatura en el mismo; lo que da una nueva temperatura de borde y así sucesivamente hasta llegar a un equilibrio entre la temperatura de borde y el diámetro dilatado de la pastilla.

Con el fin de obtener analíticamente estos valores de equilibrio se deben utilizar métodos iterativos. Aquí se ideó una solución gráfica aprovechando el graficador de la computadora de mesa.

Para ello se plantearon las ecuaciones que dan el diámetro dilatado de la pastilla en función de la temperatura superficial de la misma, de dos maneras diferentes. Una, partiendo del centro de la pastilla hacia el borde, la que tiene

en cuenta la conductividad térmica del UO_2 y la correspondiente dilatación radial de la pastilla.

Se ha supuesto como simplificación que el UO_2 se dilata en función de la temperatura promedio.

Dicha expresión es:

$$D_u = D_{u0} [1 + \alpha_u (\bar{T} - 20)] \quad (7)$$

Donde:

$$\alpha_u = 5,797 \cdot 10^{-6} + 5,792 \cdot 10^{-9} \bar{T} \quad (8) \quad [6]$$

$$\bar{T} = \frac{T_s + 2 T_c}{3}$$

Esto suponiendo dentro de la pastilla una distribución parabólica de la temperatura con un máximo en el centro e igual a T_c .

$$\text{y } T_c = T_s \cdot \exp(0.0015 \cdot q') + 950 (\exp(0.0015 q') - 1) \quad (17)$$

En el punto siguiente veremos de donde se obtiene esta última expresión.

La segunda expresión surge de considerar el fenómeno a partir del diámetro interior de la vaina hacia adentro y es donde se tiene en cuenta la conductividad térmica del gas que llena el gap, en este caso Helio.

Partimos de considerar el gradiente de temperatura en el gap que viene dado por:

$$\Delta T_G = T_s - T_I = \frac{D_I - D_u}{2 \pi D_u} \cdot \frac{q'}{\lambda_{He}} \quad (10)$$

De donde obtenemos que:

$$D_u = \frac{D_I \cdot q'}{2\pi(T_s - T_I) \lambda_{He} + q'} \quad (11)$$

En las cuales

$$\lambda_{He} = 1,44 \cdot 10^{-5} + 3,36 \cdot 10^{-6} T_c \quad (12)$$

$$T_G = \frac{T_I + T_s}{2} \quad (13)$$

Se dibujan con la computadora la variación del diámetro dilatado de la pastilla (D_u) en función de la temperatura superficial de la misma para ambas ecuaciones (7) y (11) y el punto de intersección nos da la condición de equilibrio para cada caso.

En los gráficos 2,3 y 4 se puede ver esta representación para algunos valores de q' y para las temperaturas exteriores de vaina aquí consideradas.

Entonces de dichos gráficos, a partir de la intersección de las curvas correspondientes, obtenemos la temperatura superficial y el diámetro dilatado de la pastilla para las diferentes condiciones de trabajo.

2.4. Cálculo de la temperatura del centro de la pastilla de UO_2

A partir de la ecuación de transmisión de calor de Fourier

$$\frac{dq}{dt} = -A k(T) \frac{dT}{dx} \quad (14)$$

y considerando una geometría cilíndrica, para una fuente de calor homogénea, se llega a:

$$\int_{T_s}^{T_c} k(T) dT = \frac{q'}{4\pi} \quad (15) \quad [4]$$

Adoptando

$$k(T)_{UO_2} = \frac{52.9}{950 + T} \quad (16)$$

Introduciendo este valor en la (15), integrando y haciendo las operaciones indicadas llegamos a

$$T_c = T_s \cdot \exp(0.0015 \cdot q') + 950 (\exp 0.0015 q' - 1) \quad (17)$$

A partir de esta última fórmula y para una potencia lineal, dada, conociendo la temperatura de borde, se puede determinar la temperatura del centro de la pastilla.

Nuevamente aprovechando el graficador de la computadora se graficó $T_c = f(T_s)$ según la (8) para diferentes valores de q' (Gráfico 5). En esas curvas se entra con la temperatura de borde y para un q' dado se establece directamente en las ordenadas la temperatura del centro de la pastilla.

2.5. Cálculo de la temperatura del borde del "dishing"

Las pastillas de UO_2 tienen en uno o ambos extremos una concavidad para reducir la dilatación longitudinal de la misma por efecto de las altas temperaturas alcanzadas cerca del centro. Esta concavidad se la conoce

comunmente con el nombre de "dishing".

El borde de este "dishing" es la única parte de la pastilla que está en contacto con las adyacentes y es la dilatación de esta zona la que determina la dilatación térmica longitudinal de toda la columna de pastillas que forman la barra combustible.

Por ello es importante conocer la temperatura en esa zona pues, dicha temperatura es la que regula en última instancia la dilatación longitudinal de la barra.

Para determinar esta temperatura se supuso una distribución parabólica de temperaturas con su máximo en el centro de la pastilla, de la misma manera que se hizo para hallar la temperatura media dentro del combustible.

Con la suposición anterior, se calcula la temperatura del borde del dishing con:

$$T_D = T_c + (T_s - T_c) \left(\frac{D_D}{D_U} \right)^2 \quad (18)$$

Para el caso particular del Blanket se tiene:

$$D_D = D_U - 0.2$$

Se obtuvieron las diferentes temperaturas T_D , haciendo uso de la computadora de mesa (Programa 3)

3. RESULTADOS

Se compararon los datos obtenidos por este método con los dados por

el código de cálculo desarrollado por el Ing. Parkansky (2). Los resultados están volcados en la tabla 1.

A partir de dichos resultados se graficaron las diferentes temperaturas en función de la potencia lineal para los seis casos en estudio (Gráficos 6 y 7)

Se puede destacar lo siguiente:

3.1. La temperatura de borde da valores del orden del 10% más bajas que las del programa PARK. Esto se debe al hecho de no utilizar todos los términos de la fórmula que da la conductividad térmica del Helio en función de la temperatura.

Con la aproximación realizada, se trabajó con una conductividad mayor dando como consecuencia temperaturas menores en el borde de la pastilla.

En los proximos cálculos a realizar se modificará esta aproximación.

3.2. Donde se notan diferencias más notables es en la temperatura del dishing. Esto se debe a que la aproximación parabólica aquí utilizada da una distribución de temperaturas radiales (gráfico 9) mas elevadas que las calculadas paso a paso como lo hace el programa PARK. A pesar de ello, la aproximación parabólica se usa corrientemente en cálculos de barras combustibles.

3.3 La temperatura del centro de la pastilla de UO_2 coincide aproximadamente en ambos casos, salvo en potencias elevadas ($q \approx 400 \text{ W/cm}$) donde se nota un error en exceso de alrededor del 4%. Pero esto no es del todo cierto debido al hecho de que estos valores están directamente relacionados con la temperatura

de borde (fórmula 17) y nosotros tenemos magnitudes más bajas de dicha temperatura.

Considerando el error que nos introduce ese fenómeno, llegaríamos a temperaturas de centro superiores en 10% para potencias altas; para las cuales no se pretende usar este método de cálculo

3.4. En el gráfico 8 se representó para un solo caso la temperatura media y el diámetro dilatado de la pastilla, que están ligados por el modelo de cálculo aquí adoptado.

Vemos que en este caso, la temperatura media obtenida a partir de la aproximación parabólica, no difiere mayormente de la obtenida de promediar todos los valores hallados como lo hace el programa PARK.

4. CONCLUSIONES

Con los datos iniciales, referentes a este prototipo de Blanket y con los criterios de diseño para el mismo adoptados, que son:

4.1. Que la pastilla no toque la vaina, para evitar así tensiones que lleven a deformaciones permanentes de la misma

4.2. Que la temperatura del centro de la pastilla no sea nunca superior a 1000 °C, para que no se liberen prácticamente gases de fisión y no existan cambios apreciables en la estructura interna del UO_2 .

Llegamos a la conclusión que tanto para temperaturas exteriores de 80°C como de 120°C, este prototipo puede trabajar hasta potencias lineales específicas de

350W/cm.

5. RECOMENDACIONES

De todo lo analizado anteriormente surgen algunas necesidades evidentes de estudio:

5.1. Es importante hacer un estudio profundo de la conductividad térmica del UO_2 en función de la temperatura y el quemado y su aplicación a nuestras pastillas. Especialmente en las zonas de temperaturas menores de 500°C y mayores de 1500°C , donde no hay un criterio formado al respecto.

5.2. En este trabajo se utilizó una simplificación del modelo de dilatación de las pastillas (que se dilatan en función de la temperatura media). Es conveniente profundizar este modelo y obtener uno que encare globalmente el problema aproximandose así a la realidad.

5.3. Este modelo de cálculo no tiene en cuenta el caso del contacto vaina-pastilla . Faltaría introducir en los programas este nuevo fenómeno para completar así todo un análisis de la distribución de temperaturas en las barras combustibles.

5.4. Es necesario comparar los resultados de los cálculos con datos experimentales a fin de comprobar la total validez de los mismos.

El estudio del punto 5.1. lo encara actualmente el grupo de Estudio de Materiales Combustibles del Area de Desarrollos de Elementos Combustibles.

En lo que hace a los puntos 5.2 y 5.3 son estudiados por el grupo de Cálculo y diseño de Elementos Combustibles del Area citada anteriormente.

Este último grupo encara también la programación de una experiencia de

irradiación en el "Círculo de Irradiación CI-1 del RA-3" en el cual se comprobarán los cálculos efectuados según se expone en 5.4.

El trabajo que se expone es la primer etapa de un programa de cálculo más completo que se sigue desarrollando con la estrecha colaboración del Ing.D. Parkanski del Depto de Reactores, tendiente a poseer un código que efectúe el análisis termodinámico completo de barras combustibles en condiciones de generación de potencia.

6. DATOS Y CONSTANTES UTILIZADAS

6.1. Vaina de Aluminio

$$D_{EO} = 1.247 \pm 0.002 \text{ cm}$$

$$\lambda_{Al} = 2.05 \text{ W/cm } ^\circ\text{C (A } 100^\circ\text{C)}$$

$$D_{IO} = 1.047 \pm 0.002 \text{ cm}$$

$$\alpha_{Al} = 2.38 \times 10^{-5} \text{ } 1/^\circ\text{C (A } 100^\circ\text{C)}$$

6.2 Gas que llena el gap (helio)

Uno de los valores publicados para la conductividad térmica del Helio es: (3)

$$\lambda_{He} = 1.44 \times 10^{-3} + 3.36 \cdot 10^{-6} \overline{T}_G - 1.17 \cdot 10^{-9} \overline{T}_G^2$$

Debido al rango de temperaturas que trabaja este prototipo y a los fines de simplificar el cálculo despreciamos el término cuadrático, quedando

$$\lambda_{He} = 1.44 \cdot 10^{-3} + 3.36 \cdot 10^{-6} \overline{T}_G \quad (12)$$

Esta aproximación no fue del todo feliz pues llevó a tener temperaturas de borde de pastilla inferiores a las que da el programa PARK, el que utiliza todos los términos. En este programa se mantuvo esta aproximación, la que será modificada en las futuras aplicaciones.

6.3. Pastillas de UO₂ natural sintetizadas

$$D_{UO} = 1.040 \pm 0.003 \text{ cm}$$

$$\rho_{UO_2} = 10.5 \text{ g/cm}^3 \text{ . -}$$

$$\text{Distancia del borde del dishing al borde de la pastilla} = 0.07 \pm 0.03 \text{ cm}$$

$$\text{Volumen del dishing} = 20 \pm 5 \text{ mm}^3$$

$$\text{Alto de la pastilla} = 1.2 \pm 0.05 \text{ cm}$$

La conductividad térmica del UO₂ fue estudiada por diferentes investigadores dando valores dispares especialmente para temperaturas menores de 500°C y

mayores de 1500 °C. Se adoptó aquí el valor dado por Robertson (3), (5) para UO_2 irradiado por ser el más bajo en la zona de trabajo de este prototipo ($< 1000^\circ\text{C}$) y que viene expresado analíticamente por:

$$k(T) = \frac{f \cdot 61.5}{950 + T} + 10^{-12} (273 + T)^3$$

A su vez despreciamos el término cúbico debido al rango de temperaturas que utilizaríamos y también por problemas del método de cálculo. Esta aproximación es posible pues no da errores apreciables en el valor de temperaturas de centro, para las potencias que puede utilizarse este método de cálculo.

Entonces

$$k(T) = \frac{f \cdot 61.5}{950 + T}$$

A su vez si hacemos la corrección por porosidad

$$k(T) = (1 - \alpha P) \frac{f \cdot 61.5}{950 + T}$$

Donde $P = 0.04$ (Fracción de poros del UO_2) y $\alpha = 2.6$ coeficiente de proporcionalidad adoptado. Haciendo las operaciones indicadas queda por último en nuestro caso:

$$k(T) = \frac{52.9}{950 + T} \quad (16)$$

6.4. NOMENCLATURA

D_{EO} _____	Diámetro exterior de la vaina (cm)
D_{IO} _____	" interior " " " "
D_{UO} _____	" de la pastilla de UO_2 "
D_E _____	" D_{EO} dilatado "
D_I _____	" D_{IO} " "
D_U _____	" D_{UO} " "
D_D _____	" del dishing "
f _____	Fracción de la densidad de UO_2 respecto a la teórica.
$k(T)$ _____	Conductividad térmica del UO_2 ($W/cm^{\circ}C$)
P _____	Fracción de Volumen de poros dentro del UO_2)
q' _____	Potencia específica lineal de la barra (W/cm)
T_E _____	Temperatura exterior de la vaina ($^{\circ}C$)
T_I _____	" interior " " " "
T_S _____	" superficial de la pastilla ($^{\circ}C$)
T_C _____	" del centro de la pastilla "
T_D _____	" del dishing "
$\bar{T}_V$ _____	" media de la vaina "
$\bar{T}_G$ _____	" " del gap "
$\bar{T}$ _____	" " de la pastilla "
ΔT_V _____	Gradiente de temperatura en la vaina "
ΔT_G _____	" " " " el gap "

13.

α_{Al} _____

α_U _____

λ_{Al} _____

λ_{He} _____

Coeficiente de dilatación radial del Al (1/°C)

" " " " " " UO₂ "

" " conductividad térmica del Al(W/cm°C)

" " " " " He (")

BIBLIOGRAFIA

- 1- R.O CIRIMELLO. Diseño de Elementos Combustibles-Elementos Combustibles para la CNA -CNEA -1970
- 2- D.PARKANSKY. Distribución de temperaturas en barras combustibles de UO_2 (Código de Cálculo) CNEA. Mayo 1971.
- 3- I. DEVOLT. A study of the temperature distribution in UO_2 reactor fuel elements. AE 318.
- 4- J.A.L. ROBERTSON. $\int k d\theta$ in fuel irradiations, CRFD 835
- 5- IAEA. Thermal Conductivity of Uranium Dioxide TRS 59, Viena 1966.
- 6- R.R HAMMER. Zircaloy 4, Uranium Dioxide and Materials formed by their Interaction. A literature Review with extrapolation in Physical Properties to High Temperatures- TID 4500

Para la concreción del presente trabajo colaboraron los demás integrantes del Grupo de Cálculo y diseño de Elementos Combustibles y el Ing. Parkanski del Dto. de Reactores.

TABLA N° 1

Q'	T _E	T _F	T _S (°C)			T _C (°C)			T _D (°C)			T _M (°C)			D _{EO} (cm)			D _{IO} (cm)			D _I (cm)			D _{uo} (cm)			D _u (cm)			Gap ϕ in. (μm)			Gap ϕ fin (μm)		
W/cm	°C	°C	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
100	80	81.4	115	137	154	285	310	330	174	197	215	224	252	271	1.245	1.247	1.249	1.045	1.047	1.049	1.04651	1.04851	1.05051	1.041	1.040	1.037	1.0425	1.0417	1.0391	40	70	120	40.0	68.0	114.0
200	"	82.7	126	164	224	500	550	635	255	298	367	375	421	498	"	"	"	"	"	"	54	53	53	"	"	"	439	434	412	"	"	"	26.4	51.2	93.2
300	"	84.1	111	161	238	720	795	915	322	380	473	517	584	689	"	"	"	"	"	"	56	55	55	"	"	"	455	453	437	"	"	"	10.6	32.4	68.4
400	"	85.4	T _{oca}	127	215	T	1020	1180	T	435	549	T	722	858	"	"	"	"	"	"	58	56	56	"	"	"	T	472	462	"	"	"	0	13.6	43.6
500	"	86.8	"	T	162	"	T	1415	"	T	594	"	T	997	"	"	"	"	"	"	59	58	58	"	"	"	"	T	486	"	"	"	0	19.8	
600	"	88.2	"	"	87	"	"	1615	"	"	613	"	"	1106	"	"	"	"	"	"	61	60	60	"	"	"	"	"	505	"	"	"	"	1.0	
100	120	121.4	157	178	212	330	360	395	217	241	276	272	296	334	"	"	"	"	"	"	1.04750	1.04951	1.05151	"	"	"	1.0429	1.0421	1.0395	"	"	"	46.0	74	120.0
200	"	122.7	169	205	262	560	610	685	304	345	409	430	475	544	"	"	"	"	"	"	52	52	53	"	"	"	445	438	418	"	"	"	30.2	57.2	97.2
300	"	124.1	154	201	274	785	860	970	372	412	515	535	607	738	"	"	"	"	"	"	54	54	55	"	"	"	462	461	444	"	"	"	16.4	34.4	71.4
400	"	125.4	T	167	250	T	1090	1240	T	486	592	T	782	910	"	"	"	"	"	"	55	56	56	"	"	"	T	481	471	"	"	"	0	14.6	44.3
500	"	126.8	"	T	195	"	T	1480	"	T	638	"	T	1052	"	"	"	"	"	"	57	58	58	"	"	"	"	T	496	"	"	"	0	19.8	
600	"	128.2	"	"	T	"	"	T	"	"	T	"	"	T	"	"	"	"	"	"	59	59	60	"	"	"	"	"	T	"	"	"	"	0	
DATOS PROGRAMA PARK																																			
81.7	80	81.1	111.9	131	141	243	270	304	146	166	197	201	221	253	1.242	1.242	1.242	1.045	1.047	1.049	1.04650	1.04851	1.05051	1.041	1.040	1.037	1.0423	1.0415	1.0388	40	70	120	42.0	70.0	116.0
163	"	82.2	127	161	214	422	464	531	199	235	292	316	355	417	"	"	"	"	"	"	51	52	52	"	"	"	433	427	404	"	"	"	32.0	58.2	101.2
245	"	83.3	127	172	242	596	659	758	237	287	365	424	481	569	"	"	"	"	"	"	53	53	53	"	"	"	444	441	422	"	"	"	21.2	44.2	83.2
326	"	84.4	112	165	249	767	850	977	261	322	417	522	594	706	"	"	"	"	"	"	54	54	55	"	"	"	456	455	440	"	"	"	9.4	30.4	65.4
408	"	85.4	T	143	235	T	1029	1181	T	340	449	T	693	825	"	"	"	"	"	"	55	56	58	"	"	"	T	469	459	"	"	"	0	16.6	46.6
490	"	86.6	"	107	206	"	1194	1366	"	342	462	"	776	925	"	"	"	"	"	"	57	57	58	"	"	"	"	481	475	"	"	"	"	4.6	31.8
81.7	120	121	153	171	200	295	315	347	184	207	237	245	264	296	"	"	"	"	"	"	1.04749	1.04950	1.05151	"	"	"	1.0427	1.0419	1.0391	"	"	"	47.8	76.0	124.0
163	"	122	170	202	252	476	516	580	245	278	333	366	403	462	"	"	"	"	"	"	51	52	52	"	"	"	438	432	409	"	"	"	37.0	63.2	106.2
245	"	123	171	213	281	668	717	811	285	332	407	499	533	617	"	"	"	"	"	"	52	53	54	"	"	"	451	447	428	"	"	"	24.2	48.2	87.4
326	"	124	156	207	286	835	913	1033	311	369	459	581	650	756	"	"	"	"	"	"	54	54	55	"	"	"	464	463	448	"	"	"	11.4	32.4	67.4
408	"	125	127	183	272	1002	1096	1240	321	387	492	620	751	877	"	"	"	"	"	"	55	56	56	"	"	"	476	477	467	"	"	"	0.4	18.6	48.6
490	"	126	T	146	242	T	1264	1426	T	390	506	T	836	979	"	"	"	"	"	"	57	57	58	"	"	"	T	496	484	"	"	"	0	0.2	31.8

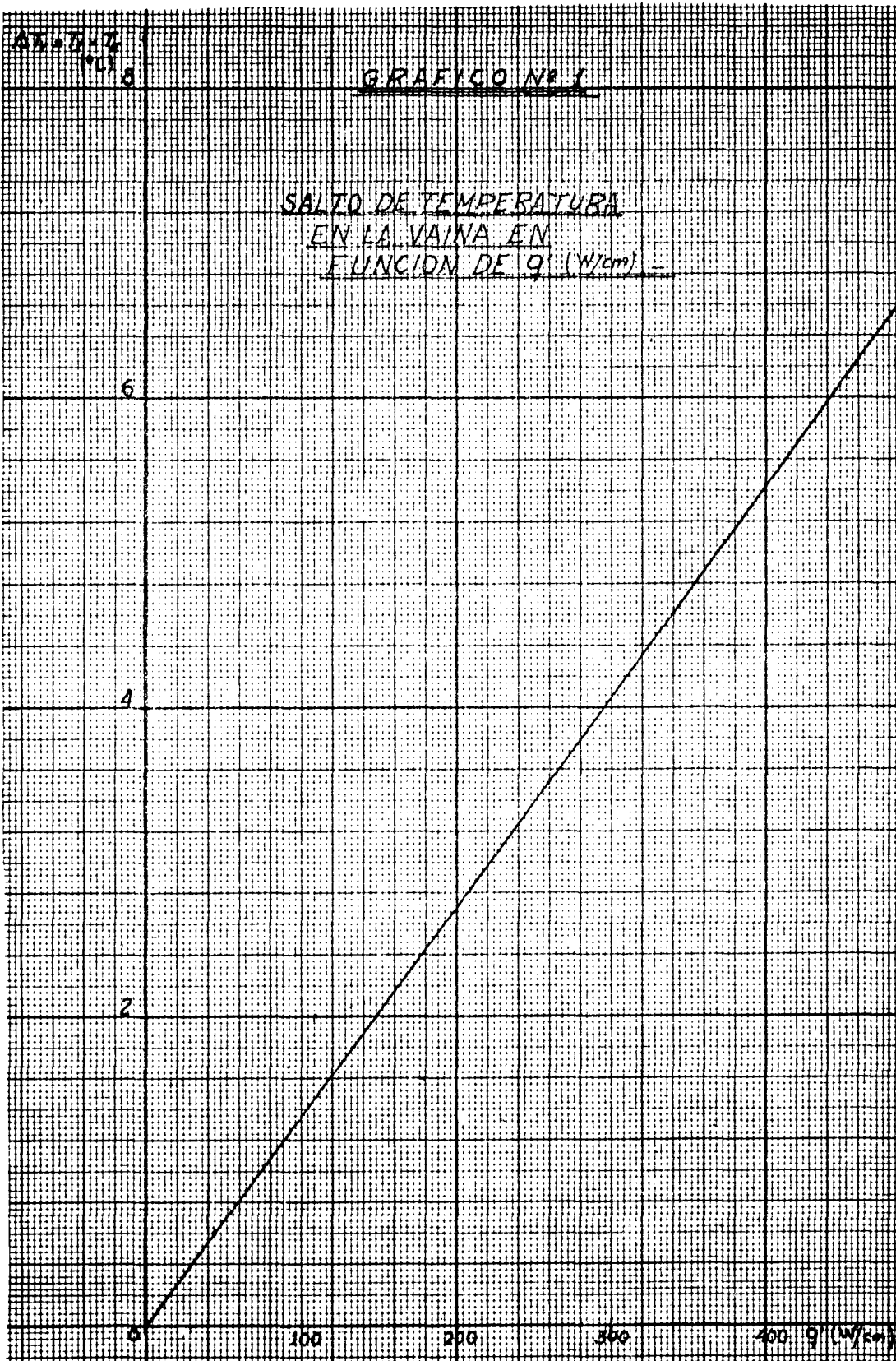


GRAFICO Nº 2

DIAMETRO DILATADO DE LA PASTILLA (DU)
EN FUNCION DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL (T_S)

CASO 1
CAP. MINIMO

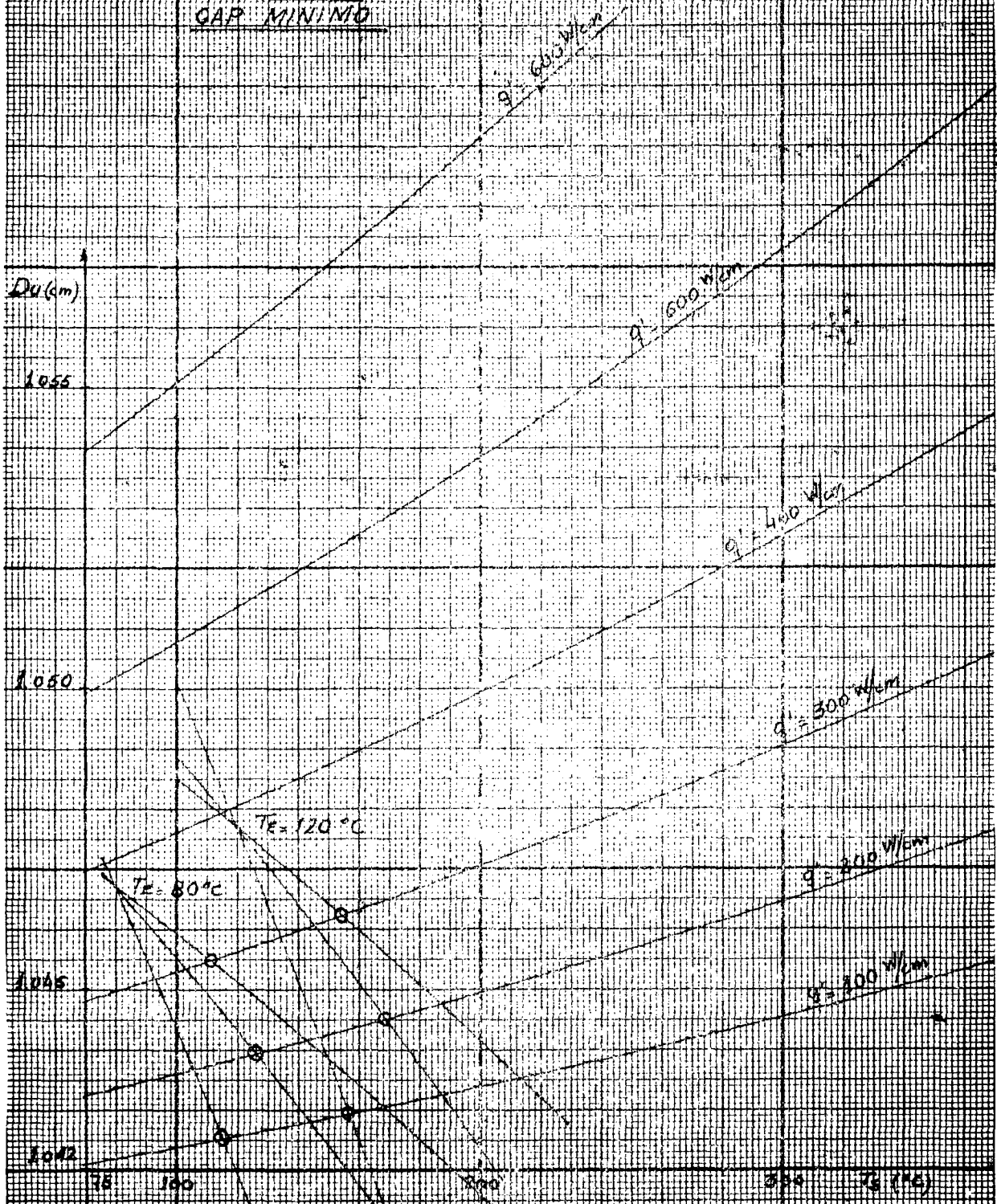


GRAFICO Nº 3

DIAMETRO CUADADO DE LA PASTILLA (D_u)
EN FUNCION DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL (T_s) =

CASO 2

GAP NOMINAL

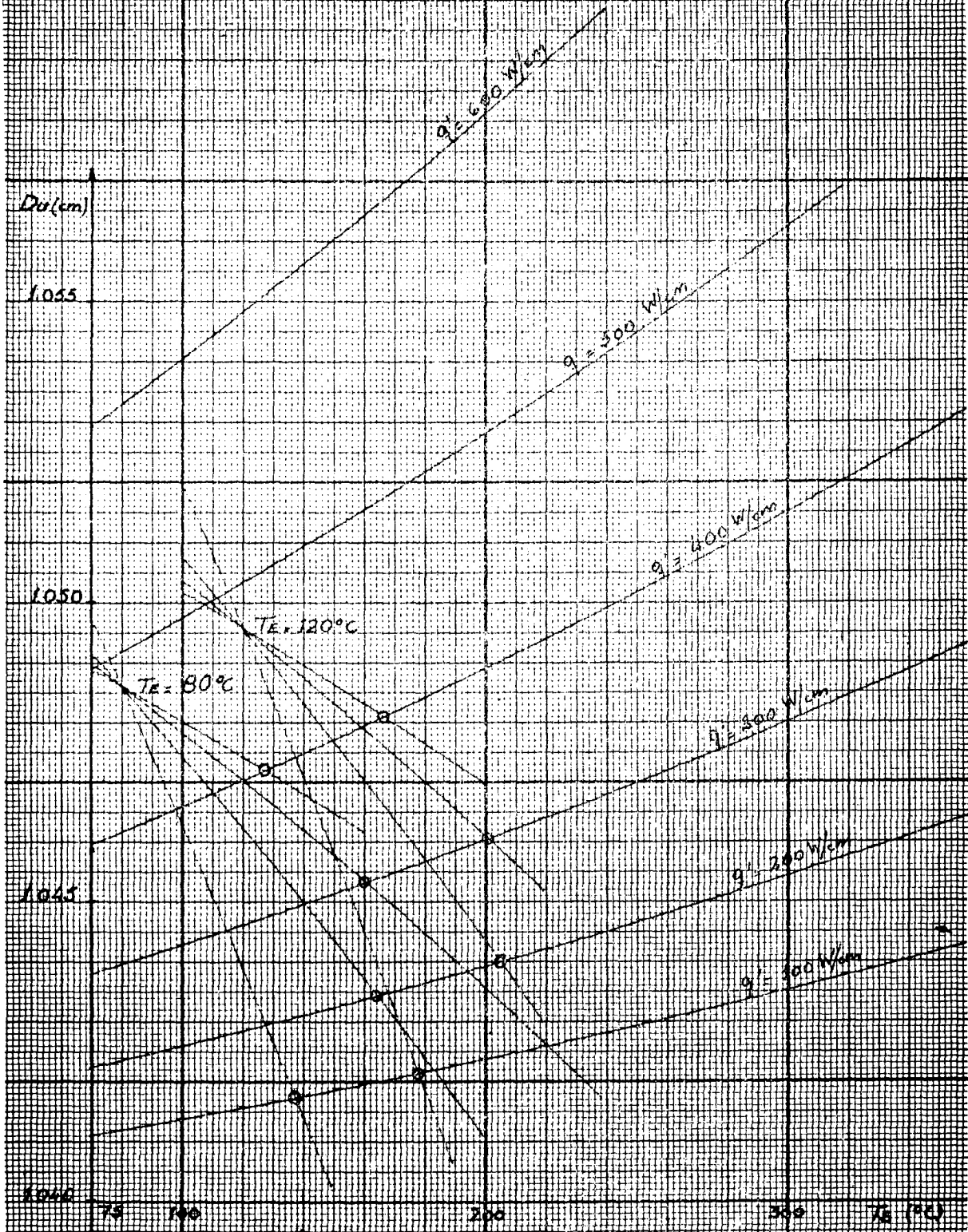


GRAFICO N° 4

DIAMETRO DILATADO DE LA PASTILLA (D_d)
EN FUNCION DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL (T_s)

CASO 3

GAP MAXIMO

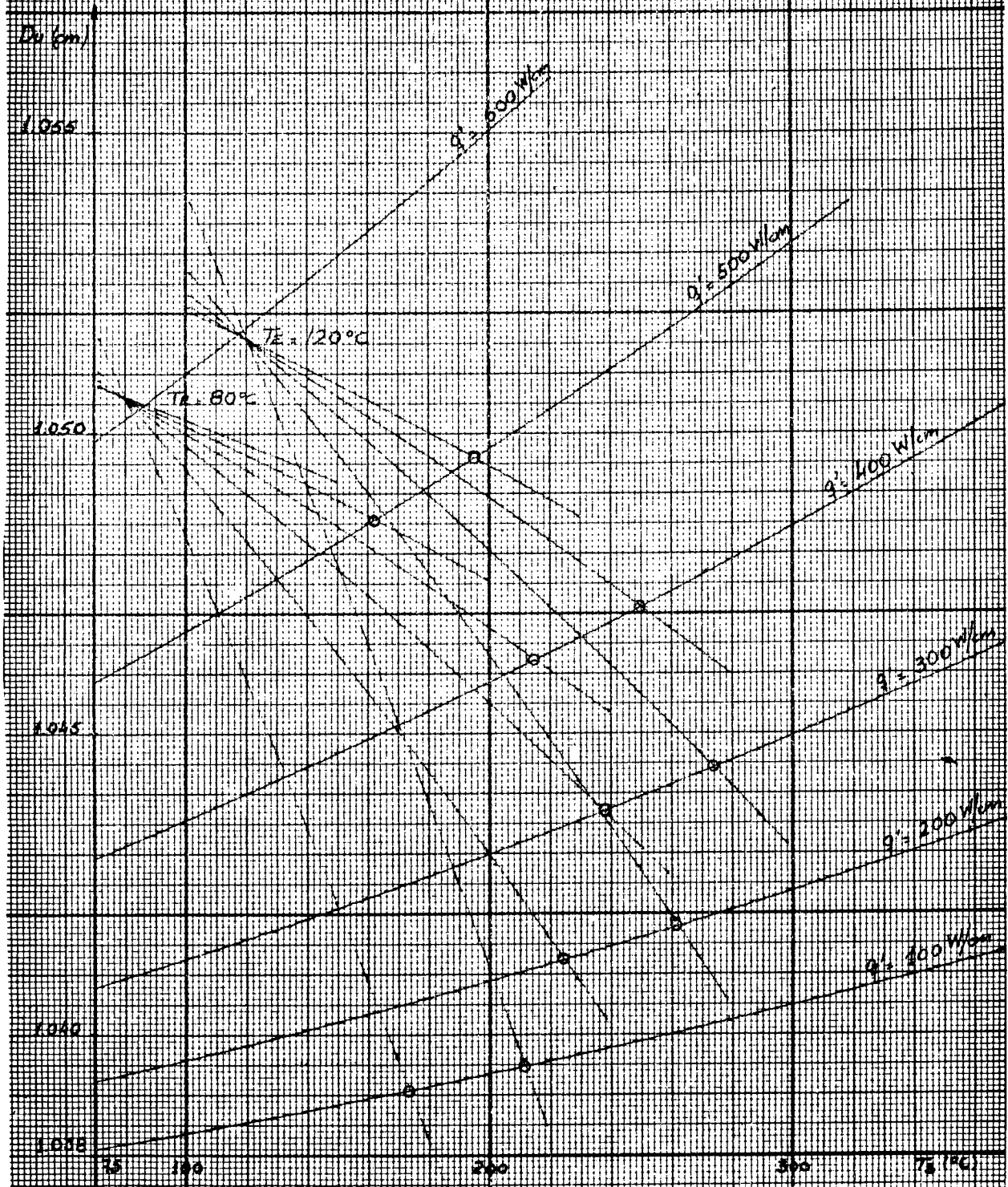


GRAFICO N° 3

TEMPERATURA DEL CENTRO DE LA PASTILLA (T_c)
 EN FUNCION DE SU TEMPERATURA SUPERFICIAL (T_s)
 (SEGUN J. A. I. ROBERTSON)

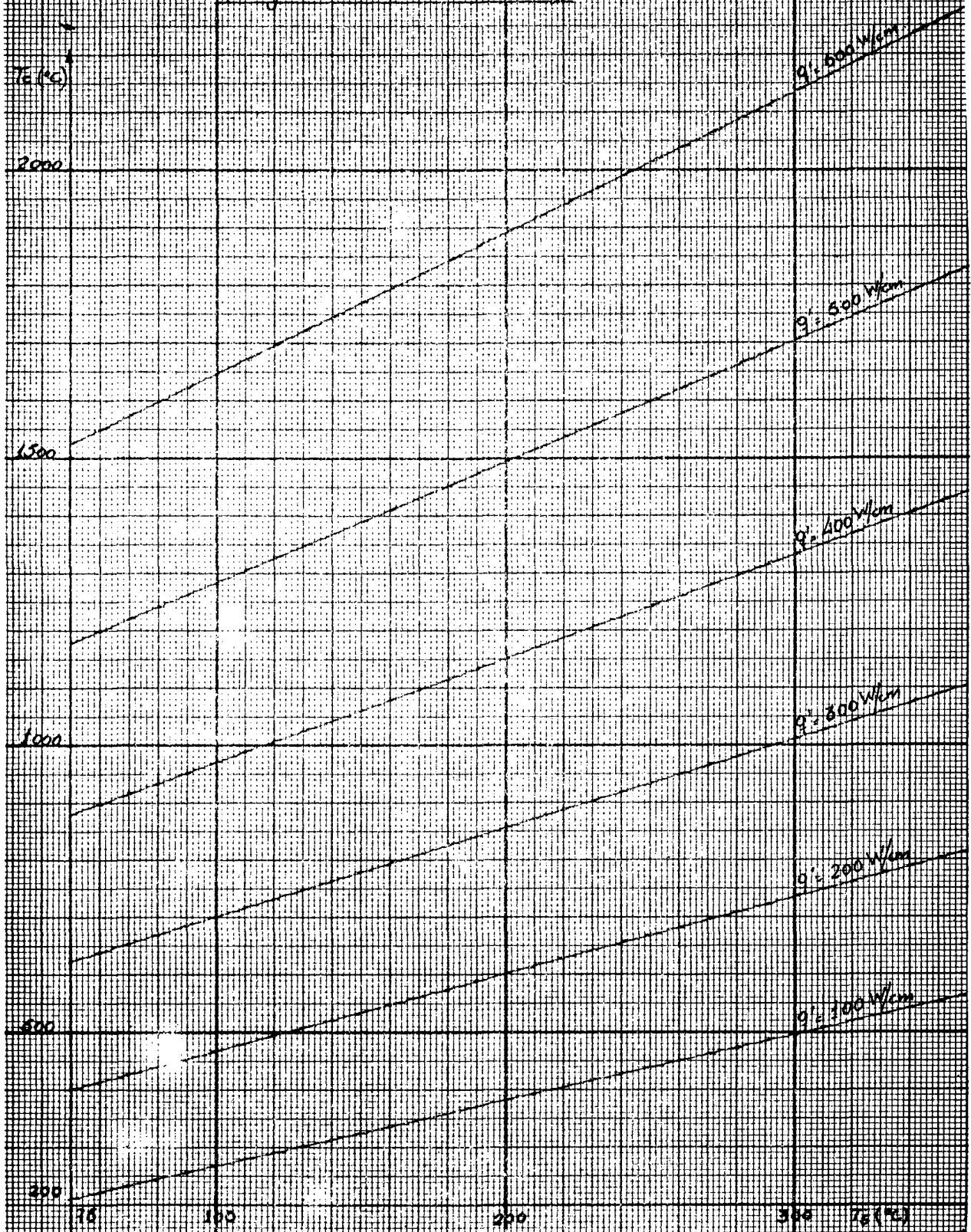


GRAFICO Nº 6 -

DISTRIBUCION DE TEMPERATURA EN FUNCION DE q' (W/cm).-

PARA CASOS 1, 2 y 3 -

$T_F = 80^\circ\text{C}$

	<u>MONT.</u>	<u>PARK.</u>
T_i	---	
T_s	---	o
T_D	---	+
T_C	---	Δ

$T (^\circ\text{C})$

- 1. gap mínimo
- 2. " nominal
- 3. " máximo

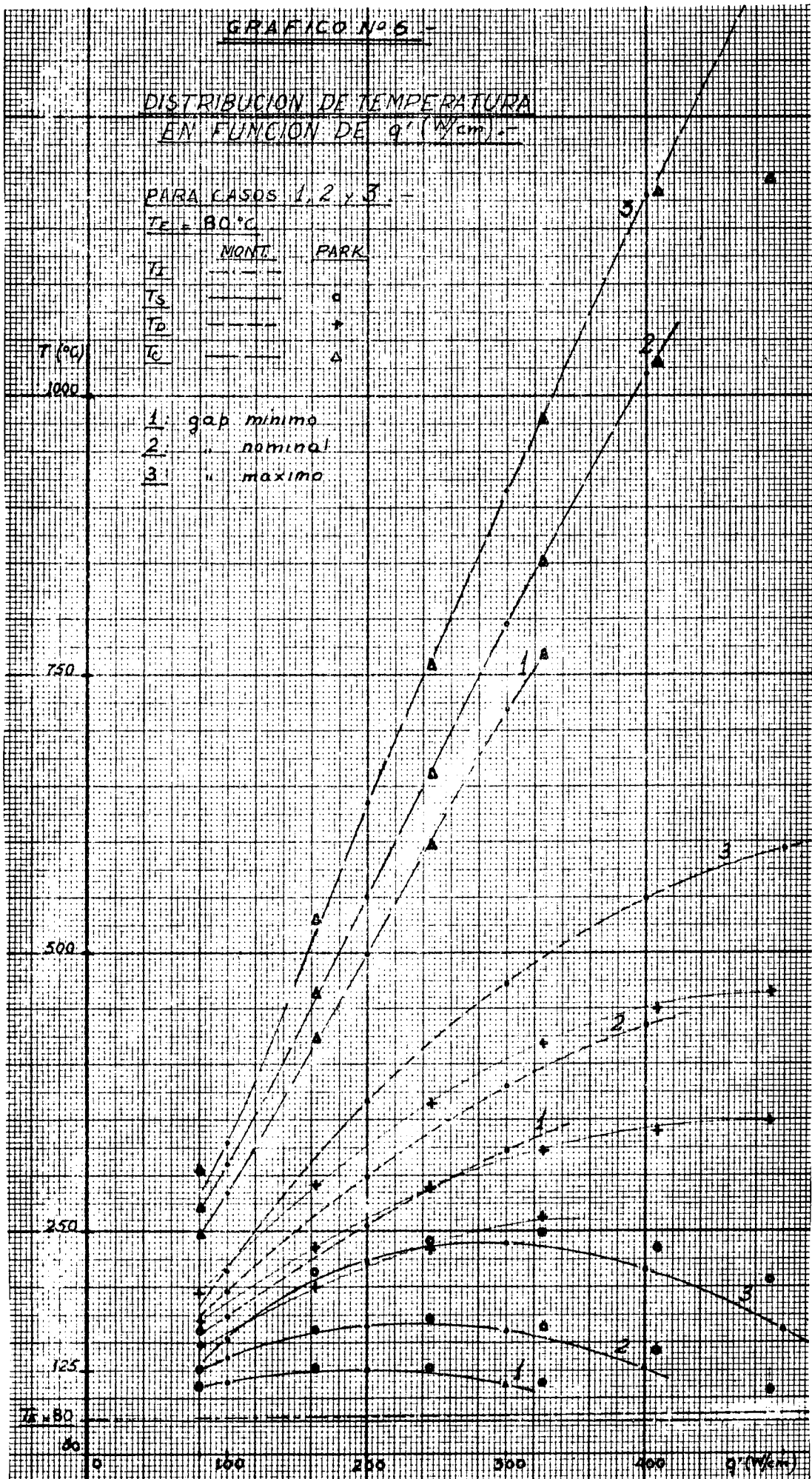


GRAFICO N° 8 -

TEMP MEDIA Y DIAMETRO DILATADO
DE U. EN FUNCION DE q' (W/cm).

PARA CASO 3

$T_E = 120^\circ\text{C}$

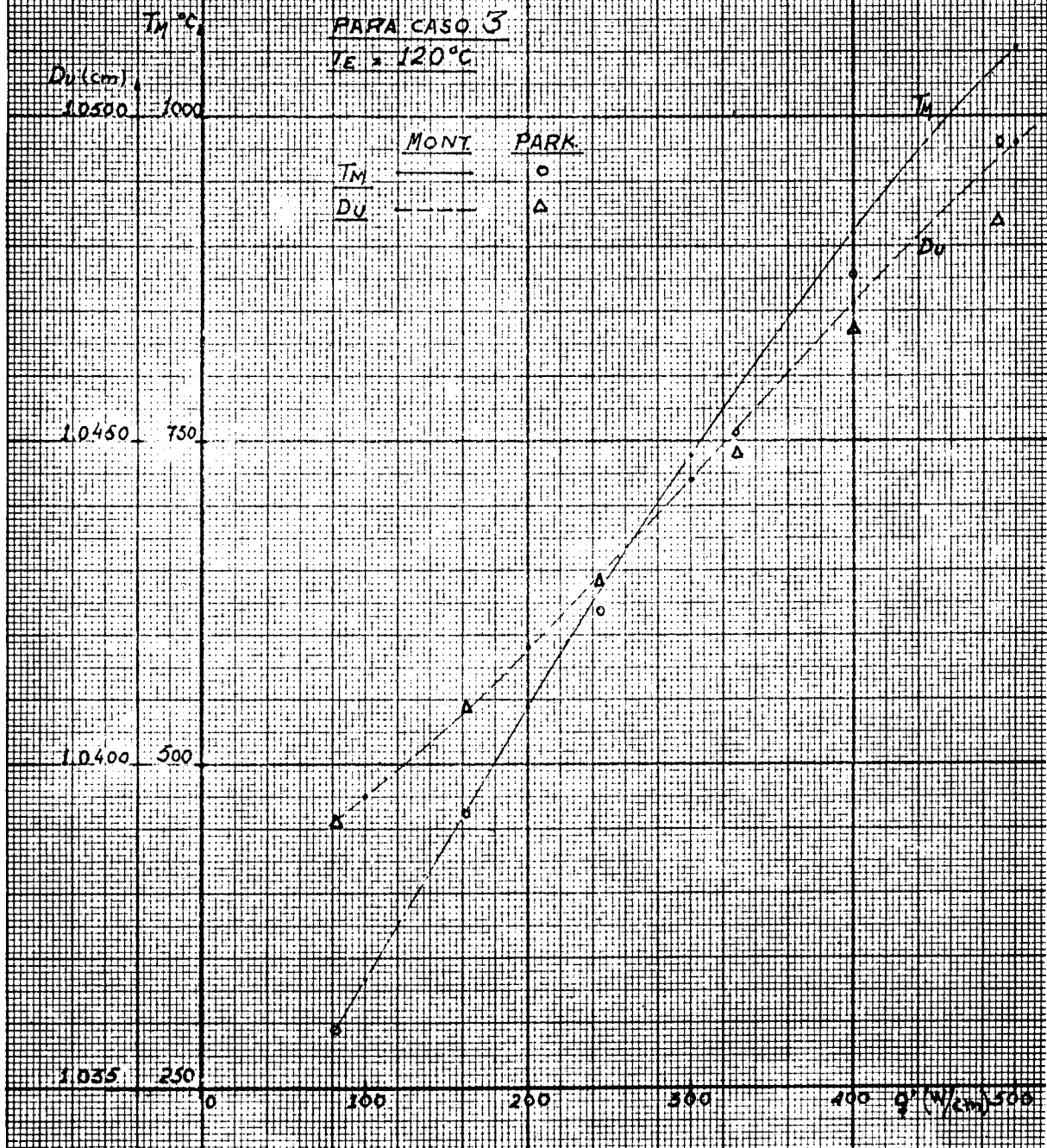


GRÁFICO Nº 9

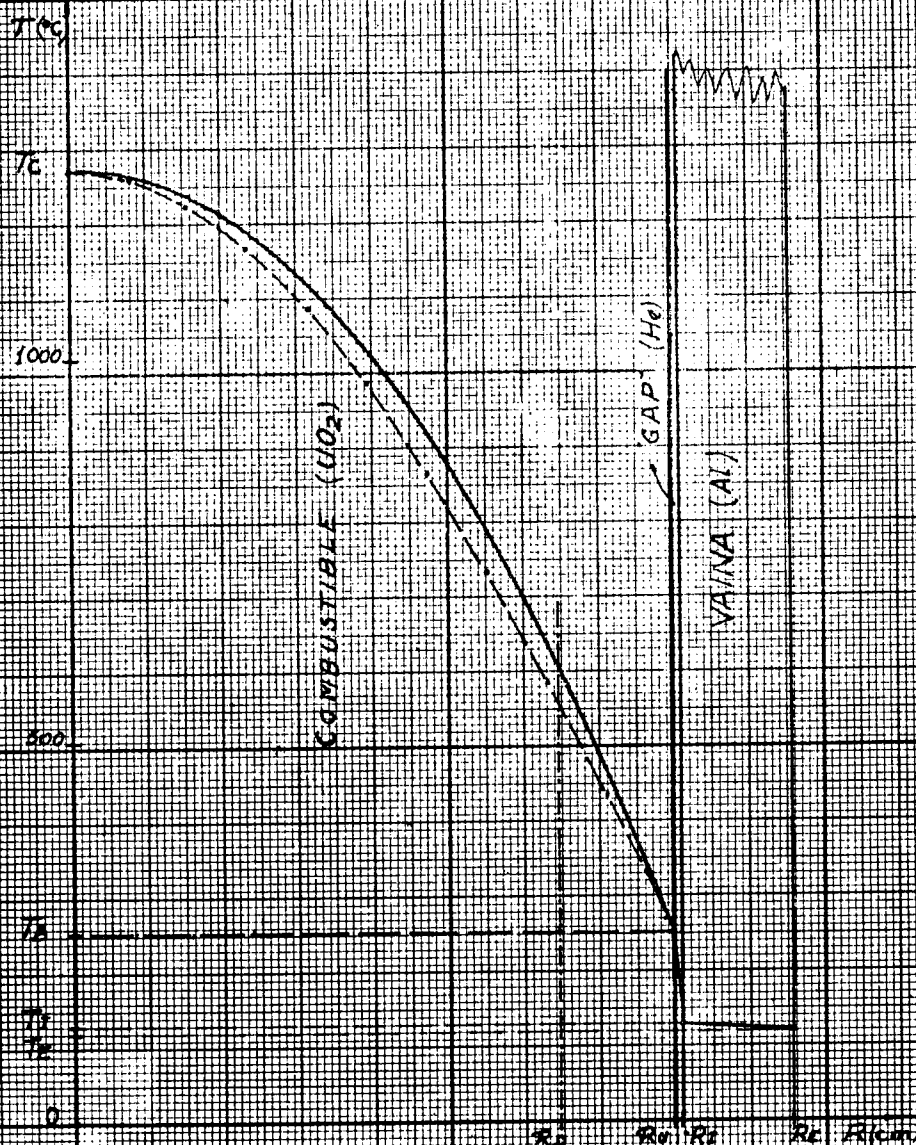
DISTRIBUCION RADIAL DE TEMPERATURA EN LA BARRA COMBUSTIBLE .-

CASO 3

$T_c = 120^\circ\text{C}$

MONT. : ———

PARR. : - - -



PROGRAMA 1 - FORMULA (6)

Title DIAMETRO DILATADO DE LA VAINA (D_I).

[22] HEWLETT-PACKARD						[23] HEWLETT-PACKARD						[24] HEWLETT-PACKARD						[25] HEWLETT-PACKARD					
Step	Key	Code	Display			Step	Key	Code	Display			Step	Key	Code	Display			Step	Key	Code	Display		
			x	y	z				x	y	z				x	y	z				x	y	z
0	RCL		T_I	T_E		10						0											
1	+			$T_E + T_I$		11						11											
2	2		2			12						12											
3	%			$\overline{T_V}$		13						13											
4	2					14						14											
5	0		20			15						15											
6	-			$\overline{T_V} - 20$		16						16											
7	2					17						17											
18	3					18						18											
9	8					19						19											
a	ENTERED					a						a											
b	CHG SIGN					b						b											
c	5		α_{A1}			c						c											
d	x			$\alpha_{A1}(\overline{T_V} - 20)$		d						d											
10	1		1			20						20											
11	+			$1 + \alpha_{A1}()$		21						21											
12	X ←					22						22											
13	d		$D_{I.O}$			23						23											
14	x			D_I		24						24											
15	STOP					25						25											
16						26						26											
17						27						27											
18						28						28											
19						29						29											
a						a						a											
b						b						b											
c						c						c											
d						d						d											
20						30						30											
21						31						31											
22						32						32											
23						33						33											
24						34						34											
25						35						35											
26						36						36											
27						37						37											
28						38						38											
29						39						39											
a						a						a											
b						b						b											
c						c						c											
d						d						d											
							</																

PROGRAMA 2 - GRAFICOS 2, 3 y 4 - FORMULAS (7) y (11). -
DIAMETRO DILATADO DE LA PASTILLA (Du) EN FUNCION

Title DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL. -

1ª PARTE

HEWLETT-PACKARD

HEWLETT-PACKARD

HEWLETT-PACKARD

HEWLETT-PACKARD

Step	Key	Code	Display			Step	Key	Code	Display			Step	Key	Code	Display		
			x	y	z				x	y	z				x	y	z
0	X →		Ts			10	2		5792			0	↑		Ts	Ts	
1	C					1	ENTER EX.					1	X ←				
2	X ←					2	CHG SIGN					2	b		Ti		
3	a		q'			3	9		579210 ⁹			3	+		Ti+Ts		
4	↑		q'	q'		4	X		T · 10 ⁶			4	2		2		
5	1					5	5					5	1/		Tg		
6	5					6	7					6	3				
7	ENTER EX					7	9					7	3				
8	CHG SIGN					8	7					8	6				
9	3		.0015			9	ENTER EX					9	ENTER EX				
10	X			.0015q'		10	CHG SIGN					10	CHG SIGN				
11	↓		.0015q'			11	6		10 ⁻⁶			11	6		B		
12	e ^x		e ^{kg'}			12	+		αu			12	X		B Tg		
13	X →					13	ROLL		T	10 ⁻⁶	αu	13	1				
14	d					14	X ↔ Y		10 ⁻⁶	T		14	4				
15	X ←					15	2					15	4				
16	C		Ts			16	0		20			16	ENTER EX				
17	↑		Ts			17	-		T-20			17	CHG SIGN				
18	X ←					18	↓		T-20	αu		18	3		A		
19	d		e ^{.0015q'}			19	X		αu()			19	+		A+B Tg		
20	X		Ts e ^{kg'}			20	1		1			20	4		A	A+B Tg	
21	↑		e ^{kg'}	Ts e ^{kg'}		21	+		fndu()			21	X ←		Ts		
22	1		1			22	1					22	C				
23	-		e ^{kg'-1}			23	.		Este valor es diferente para los diferentes casos (1, 2 y 3). -			23	X ↔ Y		A	Ts	
24	9					24	0					24	X ←				
25	5					25	4					25	b		Ti		
26	0.		950			26	1					26	-		Ts-Ti		
27	X		950(e ^{kg'})			27	X		Du			27	2				
28	↓		950() Ts e ^{kg'}			28	GO TO					28					
29	+		Tc			29	SUB					29					
30	2		2			30	+					30					
31	X		2Tc			31	0					31					
32	X ←					32	0					32					
33	C		Ts			33	IF X < Y		Ts+10	410		33					
34	+		Ts+2Tc			34	0					34					
35	3		3			35	0					35					
36	1/		T			36	FMT					36					
37	↑		3	T		37	↑					37					
38	↓		T			38	X ←					38					
39	5					39	f		Tcte			39					
40	7					40	X →					40					
41	9					41	C					41					

Title PROGRAMA 2. - 2ª PARTE -

HEWLETT-PACKARD

HEWLETT-PACKARD

HEWLETT-PACKARD

HEWLETT-PACKARD

Step	Key	Code	Display			Step	Key	Code	Display			Step	Key	Code	Display		
			x	y	z				x	y	z				x	y	z
0	X		2	$2(T_s - T_j)$	$A + B \bar{T}_0$	10	ENTER EX					0	0		10	T_s	$D_u \text{ esc.}$
1	π		π			1	CHG SGN.					1	X			$T_{s \text{ esc.}}$	$D_u \text{ esc.}$
2	x			$2\pi(T_s - T_j)$		2	3		10^{-3}			2	$\downarrow$		$T_{s \text{ esc.}}$	$D_u \text{ esc.}$	
3	$\downarrow$		$2\pi()$	$A + B \bar{T}_0$		3	+					3	FMT				
4	X			$2\pi() \times (A)$		4	0					4	$\downarrow$				
5	X $\leftarrow$					5	.					5	X $\leftarrow$				
6	a		q'			6	0					6	c		T_s		
7	+			DENOM.		7	1					7	X $\rightarrow$ y			T_s	
8	4			q'	DENOM.	8	2					8	1				
9	X $\leftarrow$					9	X $\rightarrow$ y					9	0		10		
10	e		D_r			10	IF X < Y					10	+			$T_s + 10$	
11	X			$D_r q'$		11	9					11	4				
12	$\downarrow$			NUMER. DENOM.		12	c					12	1				
13	X $\rightarrow$ y			DENOM. NUMER.		13	FMT					13	0		410		
14	%			D_u		14	$\uparrow$					14	X $\rightarrow$ y		$T_s + 10$	410	
15	GO TO					15	END					15	RETURN				
16	SUB					16						16					
17	+					17						17					
18	0					18						18					
19	0					19						19					
20	IF X < Y			$T_s + 10$	410	20						20					
21	5					21						21					
22	c					22						22					
23	FMT					23						23					
24	$\uparrow$					24						24					
25	0		0			25						25					
26	X $\rightarrow$			ESCALA		26						26					
27	9		D_u		$\downarrow$	27						27					
28	X $\rightarrow$ y			D_u		28	1			D_u		28					
29	2					29	.					29					
30	ENTER EX					30	0					30					
31	5					31	3					31					
32	X		2×10^5	$2 \times 10^5 D_u$		32	7		1.037			32					
33	0					33	-			$D_u - 1.037$		33					
34	FMT					34	2					34					
35	$\downarrow$					35	ENTER EX					35					
36	PAUSE					36	5		2×10^5			36					
37	FMT					37	X			$D_u \text{ esc.}$		37					
38	$\uparrow$					38	X $\leftarrow$					38					
39	X $\leftarrow$					39	c		T_s			39					
40	9		D_u			40	$\uparrow$			T_s	$D_u \text{ esc.}$	40					
41	X $\rightarrow$ y					41	1					41					

PROGRAMA 3 - FORMULA (18) -

Title TEMPERATURA DEL BORDE DEL DISHING. (T_D)

[02] HEWLETT-PACKARD [04] HEWLETT-PACKARD [06] HEWLETT-PACKARD [08] HEWLETT-PACKARD [10] HEWLETT-PACKARD

Step	Key	Code	Display			Step	Key	Code	Display			Step	Key	Code	Display		
			x	y	z				x	y	z				x	y	z
0	X ←					10						0					
1	f		D _u			1						1					
2	↑			D _u		2						2					
3	↑				D _u	3						3					
4	.		VARIA DE ACUERDO AL DISHING			4						4					
5	2					0, 2		5						5			
6	-			D _D		6						6					
7	↓		D _D	D _u		7						7					
8	X ↔ Y		D _u	D _D		8						8					
9	%			$\frac{D_D}{D_U}$		9						9					
10	↓		$\frac{D_D}{D_U}$	D _u		10						10					
11	↑			$\frac{D_D}{D_U}$	D _u	11						11					
12	X			$(\frac{D_D}{D_U})^2$		12						12					
13	X ←					13						13					
14	e		T _s			14						14					
15	↑			T _s	$(\frac{D_D}{D_U})^2$	15						15					
16	X ←					16						16					
17	d		T _c			17						17					
18	-			T _s - T _c		18						18					
19	↓		T _s - T _c	$(\frac{D_D}{D_U})^2$	T _c	19						19					
20	ROLL					20						20					
21	X			(T _s - T _c)(-)		21						21					
22	↓		(T _s - T _c)(-)	T _c		22						22					
23	+			T_D		23						23					
24	STOP					24						24					
25						25						25					
26						26						26					
27						27						27					
28						28						28					
29						29						29					
30						30						30					
31						31						31					
32						32						32					
33						33						33					
34						34						34					
35						35						35					
36						36						36					
37						37						37					
38						38						38					
39						39						39					
40						40						40					
41						41						41					
42						42						42					
43						43						43					
44						44						44					
45						45						45					
46						46						46					
47						47						47					
48						48						48					
49						49						49					
50						50						50					
51						51						51					
52						52						52					
53						53						53					
54						54						54					
55						55						55					
56						56						56					
57						57						57					
58						58						58					
59						59						59					
60						60						60					
61						61						61					
62						62						62					
63						63						63					
64						64						64					
65						65						65					
66						66						66					
67						67						67					
68						68						68					
69						69						69					
70						70						70					
71						71						71					
72						72						72					
73						73						73					
74						74						74					
75						75						75					
76						76						76					
77						77						77					
78						78						78					
79						79						79					
80						80						80					
81						81						81					
82						82						82					
83						83						83					
84						84						84					
85						85						85					
86						86						86					
87						87						87					
88						88						88					
89						89						89					
90						90						90					
91						91						91					
92						92						92					
93						93						93					
94						94						94					
95						95						95					
96						96						96					
97						97						97					
98						98						98					
99						99						99					
100						100						100					

Storage	
+	-
0	D _u
1	T _s
2	T _c
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	
15	
16	
17	
18	
19	
20	
21	
22	
23	
24	
25	
26	
27	
28	
29	
30	
31	
32	
33	
34	
35	
36	
37	
38	
39	
40	
41	
42	
43	
44	
45	
46	
47	
48	
49	
50	
51	
52	
53	
54	
55	
56	
57	
58	
59	
60	
61	
62	
63	
64	
65	
66	
67	
68	
69	
70	
71	
72	
73	
74	
75	
76	
77	
78	
79	
80	
81	
82	
83	
84	
85	
86	
87	
88	
89	
90	
91	
92	
93	
94	
95	
96	
97	
98	
99	
100	

PROGRAMA 4 - GRAFICO N° 9

Title DISTRIBUCION RADIAL DE TEMPERATURA EN LA BARRA COMBUSTIBLE -

Step	Key	Code	Display			Step	Key	Code	Display			Step	Key	Code	Display		
			x	y	z				x	y	z				x	y	z
0	X→		R_0			10	0					10					
1	b					1	0					1					
2	RCL		T_c	T_s		2	FMT					2					
3	-			$T_s - T_c$		3	↑					3					
4	X←					4	END					4					
5	d		R_0			5						5					
6	↑			R_0	$T_s - T_c$	6						6					
7	x			R_0^2		7						7					
8	↓		R_0^2	$T_s - T_c$		8						8					
9	÷			A		9						9					
10	X←					10						10					
11	b		r			11						11					
12	↑			r	A	12						12					
13	x			r^2		13						13					
14	↓		r^2	A		14						14					
15	x			$A r^2$		15						15					
16	X←					16						16					
17	↑		T_c			17						17					
18	+			-T		18						18					
19	2					19						19					
20	x		2	T_{esc}		20						20					
21	↑			2	T_{esc}	21						21					
22	X←					22						22					
23	b		r			23						23					
24	X↔Y		2	r		24						24					
25	3					25						25					
26	0°					26						26					
27	0		300			27						27					
28	x			T_{esc}	T_{esc}	28						28					
29	↓		T_{esc}	T_{esc}		29						29					
30	FMT					30						30					
31	↓					31						31					
32	X←					32						32					
33	b		r			33						33					
34	↑			r		34						34					
35	ENTEREX					35						35					
36	ENG SIGN					36						36					
37	2		10^{-2}			37						37					
38	-			$r \cdot 10^{-2}$		38						38					
39	0		0			39						39					
40	X↔Y		$r \cdot 10^{-2}$	0		40						40					
41	IF X>Y					41						41					

Storage

F T_c
 E T_s
 D $R_0 = D_0/2$
 C $A = (T_s - T_c)/R_0^2$
 B R_0 VARIABLE = r