

OPTIMIZACION DEL QUEMADO DE EXTRACCION DE LA CENTRAL NUCLEAR ATUCHA I

El Reactor de 3 Zonas. Sus ventajas y desventajas

H. MARTIN, A. PARKER, O. SERRA
Comisión Nacional de Energía Atómica

INTRODUCCION

Es común atribuir a los reactores de uranio natural y agua pesada un costo económico del combustible, que compensa, durante el período de vida útil de la Central, las mayores cargas de capital inicial de este tipo de reactores (inventario de agua pesada, sistemas para el recambio en operación de los elementos combustibles, sistemas para la recuperación y regeneración del agua pesada, etc.). Esta idea proviene de confundir la inherente "economía neutrónica" de los reactores de agua pesada con los costos del combustible.

El bajo quemado de extracción de los elementos combustibles de uranio natural y los costos de fabricación de los mismos, son las causas fundamentales que revierten una ecuación económica que parece favorable a primera vista.

Lo anterior es particularmente cierto para el reactor de la Central Nuclear Atucha I, cuyo costo de combustible, excluido el almacenamiento, asciende a 11,6 milis.U\$S/KWh. Ante esta cifra, basada en un quemado de extracción de 5,64 MWd/KgU se comprende perfectamente la necesidad de obtener altos quemados de descarga como contribución esencial a la disminución de los costos de generación. Para esto es necesario, entre otras cosas, optimizar los esquemas de recambio de los elementos combustibles en el reactor.

Describiremos en las páginas siguientes el esquema de recambio utilizado actualmente en la CNA I y demostraremos el por qué no es dable esperar con el mismo un quemado de extracción superior al mencionado anteriormente. Presentaremos además un proceso de optimización empírico de la estrategia de recambio de elementos combustibles para el núcleo de uranio natural de la CNA I. El mismo permite aumentar un 7% aproximadamente el quemado de extracción a través de una disminución de los efectos de fuga radial.

ESQUEMA DE RECAMBIO PARA NUCLEO EN EQUILIBRIO (1 ZONAS)

Con el objeto de disminuir los efectos de fuga radial se debe tratar de obtener la máxima densidad de potencia en el centro del núcleo. Esto se ve condicionado por razones termodinámicas y por los materiales que componen el combustible. Por lo tanto, el objetivo del proceso de optimización consiste en alcanzar la distribución de potencia más empinada compatible con todos los criterios termodinámicos.

La situación de quemado en equilibrio tiene no sólo la meta de llegar a un esquema simple y periódico de carga sino también obtener una distribución de quemado y potencia que satisfaga todos los criterios termodinámicos y económicos. El requerimiento que el anillo de cierre del tapón de los canales de refrigeración (ver Fig. 1) fuera ajustado sólo en dos oportunidades impedía trasladar los elementos combustibles más de una vez dentro del reactor durante su período de irradiación. Debido a esto el núcleo fue dividido a los fines del recambio de combustible en 4 zonas ficticias cuyo volumen fue ajustándose a lo largo del tiempo para satisfacer las restricciones termodinámicas hasta alcanzar su tamaño definitivo antes del aumento de potencia de 1977. Posteriormente se permutó una terna de canales de la zona 1 por otra de la zona 2 debido a un cambio del banco negro de regulación (ver Fig. 2).

Actualmente los elementos combustibles se colocan en el reactor según dos caminos diferentes. Por el primero los elementos combustibles nuevos se introducen en la zona 3 y quedan ahí hasta que alcanzan un quemado de aproximadamente 2.600 MWd/Tn.U. A continuación, se transfieren a la zona 1 donde permanecen hasta conseguir el quemado de extracción. Por el segundo camino los elementos nuevos se introducen por la zona 2 siendo luego transferidos a la zona 4 con un quemado de aproximadamente 4100 MWd/Tn.U. permaneciendo en la misma hasta alcanzar quemado de extracción. El procedimiento de recambio descrito tiene como consecuencia que el quemado de los elementos esté comprendido entre los siguientes valores:

en la zona 1	entre	2600	y	5640	MWd/Tn.U
en la zona 2	entre	0	y	4100	MWd/Tn.U
en la zona 3	entre	0	y	2600	MWd/Tn.U
en la zona 4	entre	4100	y	5650	MWd/Tn.U

La zona 1 contiene 52 canales de refrigeración, la zona 3 tiene 69 y las dos restantes 66 cada una.

Los valores teóricos mencionados se basan en una determinada pureza y calidad del agua pesada del reactor como así también en un cierto valor de la reactividad en exceso controlada por las barras de control (7%). Es evidente que variaciones en estos parámetros producirán variaciones sobre el estado de equilibrio y modificarán los valores mencionados.

Los quemados de extracción de cada una de las zonas no son arbitrarios ya que seleccionada la geometría es el mismo reactor el que fija el quemado de extracción y estos quemados son función de las potencias disipadas en cada zona y del quemado de extracción.

Puede demostrarse que los quemados medios de cada zona están ligados al quemado de extracción por las siguientes relaciones:

$$\overline{BU}_1 = 2 \overline{BU}_3 + \frac{1}{2} \frac{P_1}{P_1 + P_3} BU_e$$

$$\overline{BU}_2 = \frac{1}{2} \frac{P_2}{P_2 + P_4} BU_e$$

$$\overline{BU}_3 = \frac{1}{2} \frac{P_3}{P_1 + P_3} BU_e$$

$$\overline{BU}_4 = \frac{1}{2} \frac{P_4}{P_2 + P_4} BU_e + 2 \overline{BU}_2$$

donde: P_i = Potencia nuclear total liberada en la zona i en el estado de equilibrio

BU_e = Quemado medio de extracción en equilibrio

$\overline{BU}_i$ = Quemado medio en equilibrio de la zona i.

Con la ayuda del programa tridimensional TRISIC se pueden verificar estos valores sin mucho esfuerzo, por medio de un proceso iterativo. Primero, se selecciona un juego de valores P_i , normalizados por $\sum_{i=1}^4 P_i = P_{\text{REACTOR}}$ y un cierto quemado de extracción BU_e , calculando con estos valores los $\overline{BU}_i$. Se efectúa con esta distribución de quemado un cálculo con el código TRISIC obteniéndose un nuevo juego de valores P_i usando los cuales puede determinarse nuevamente los $\overline{BU}_i$. La reactividad calculada por el programa permite ajustar el valor del quemado de extracción estimado. Si el reactor es subcrítico la estimación del quemado de extracción ha sido demasiado elevada y debe disminuirse. Recíprocamente si el reactor es supercrítico es índice que debe aumentarse el quemado de extracción. El proceso iterativo se repite hasta lograr la convergencia, es decir hasta que $P_i^j = P_i^{j-1}$ y que la reactividad controlada por las barras i sea igual a 7%.

Esta simple verificación y la experiencia de los dos últimos años permiten afirmar que con este esquema de recambio la única forma de aumentar el quemado de extracción es a través de una disminución en la reactividad de reserva.

MODIFICACION DEL ESQUEMA DE RECAMBIO. LOS ANILLOS DE CIERRE

Si el esquema de recambio adoptado ha permitido alcanzar ya el máximo quemado de extracción compatible, la única forma de aumentar el mismo es modificando el esquema de recambio. Esta modificación debe tender a disminuir la fuga radial para lo cual se considera necesario aumentar el quemado medio de los elementos combustibles que se encuentran en la peri-

fería del reactor e incrementar al mismo tiempo el flujo neutrónico en el centro del núcleo. Como esquema de recambio para obtener esta meta se ha pensado en subdividir el reactor en tres zonas ficticias en lugar de las cuatro actuales (ver Fig. 3) y trabajar con un único camino de irradiación. En el mismo los elementos nuevos ingresarían al reactor por la zona 2 hasta alcanzar un quemado de aproximadamente 2770 MWd/Tn.U. Pasarían posteriormente a la zona 1 hasta alcanzar un quemado de aproximadamente 5100 MWd/Tn.U. siendo en ese momento trasladados a la zona periférica (zona 3) hasta completar su quemado de extracción (aproximadamente 6000 MWd/Tn.U.) Este esquema de recambio solo es factible si es posible utilizar los anillos de cierre en tres oportunidades sin que se presenten pérdidas de agua pesada. Desde principios del año 1979 los anillos de cierre dejaron de ser apretados a 150° cuando eran utilizados por segunda vez siendo ajustados exclusivamente a 120° y reservándose el ajuste a 150° para casos de pérdida. Esta acción, que fue tomada con el objeto de disminuir los momentos de ajuste y la probabilidad de ocurrencia de canales cuyos cierres no podían abrirse durante la operación del reactor, permitió comprobar la bondad del sistema de cierre y sus condiciones de elasticidad, y, lo más importante a los fines de este trabajo, posibilitó utilizar por tercera vez el cierre (ajustados por tercera vez a 120°) al contar con el ajuste a 150° como factor de seguridad.

Apartamientos del estado de quemado en equilibrio hicieron necesario, durante 1979 y 1980, recurrir a operaciones de recambio de tres pasos con el objeto de maximizar el quemado de extracción. En estas operaciones la modificación consistió normalmente en trasladar los elementos combustibles de la zona central a la periferia efectuando operaciones del tipo 3-1-4 ó 2-1-4.

No se cuenta con una estadística precisa pero aproximadamente se han efectuado hasta la fecha unas 100 operaciones de este tipo sin que haya sido necesario recurrir al ajuste a 150° después de haber ajustado por tercera vez a 120°.

EL REACTOR DE 3 ZONAS. ECUACIONES DE QUEMADO

Por cada elemento combustible nuevo que ingresa por la zona 2 debe trasladarse un elemento a la zona 1 y retirar un elemento de la zona 3, es decir que debe cumplirse que la frecuencia de recambio de la zona de ingreso debe ser igual a la de transferencia e igual a la de egreso, es decir

$$f_2 = f_1 = f_3 = f$$

ahora bien, la frecuencia de recambio en una zona es igual a la suma de las frecuencias de recambio de cada uno de los canales que la componen:

$$f_i = \sum_j f_i^j = \sum_j \frac{1}{T_i^j}$$

donde: f_i^j = frecuencia de recambio del canal j perteneciente a la zona i .

T_i^j = tiempo de residencia del elemento combustible i en el canal j de la zona i .

El quemado obtenido por un elemento combustible en el canal j de la zona i está dado por

$$\Delta BU_i^j = \frac{\int_0^T P_i^j dt}{m}$$

siendo P_i^j la potencia disipada por el elemento combustible y m la masa de uranio del mismo. Aplicando el teorema del valor medio y considerando que todos los elementos de una misma zona deben tener el mismo quemado de extracción o de traslado, resulta:

$$\Delta BU_i = \frac{P_i^j T_i^j}{m}$$

La potencia total de los canales pertenecientes a la zona i , P_i , estará dada por:

$$P_i = \sum_j P_i^j = \Delta BU_i m \sum_j \frac{1}{T_i^j} = \Delta BU_i m f_i$$

$$\Delta BU_i = \frac{P_i}{m f_i}$$

En equilibrio, el quemado medio de las zonas estará dado por la media aritmética de los quemados de introducción y extracción, además, para el reactor de tres zonas:

$$f_i = f = \frac{P_T}{BU_c * m}$$

donde f = frecuencia de recambio del reactor

P_T = potencia térmica total (1179 MW)

BU_c = quemado de extracción

resultado:

$$\overline{BU}_2 = \frac{1}{2} \frac{P_2}{P_T} BU_e$$

$$\overline{BU}_1 = \frac{1}{2} \frac{P_1}{P_T} BU_e + \frac{P_2}{P_T} BU_e = \frac{1}{2} \frac{(P_1 + 2P_2)}{P_T} BU_e$$

$$\overline{BU}_3 = \frac{P_2}{P_T} BU_e + \frac{P_1}{P_T} BU_e + \frac{1}{2} \frac{P_3}{P_T} BU_e = \frac{1}{2} \frac{(2P_1 + 2P_2 + P_3)}{P_T} BU_e$$

donde $\overline{BU}_i$ es el quemado medio de los elementos combustibles de la zona i .

Las anteriores son las ecuaciones fundamentales que rigen el comportamiento del reactor de tres zonas. El quemado de extracción será función de la geometría elegida y de la reactividad de reserva a la cual se desee trabajar. La selección de la geometría, es decir, del número de canales que componen cada zona, es función de los límites termodinámicos impuestos al combustible por el diseño del reactor. Esta selección se efectuó usando el método de prueba y error. Se tomó como objetivo alcanzar los 6000 MWd/Tn.U. No se consideró factible una división en zonas de igual volumen ya que el quemado de traslado a la zona 1 (y por ende el quemado medio de la zona) resultaba muy bajo lo que llevaría a una densidad de potencia intolerable en el centro del núcleo. Se tomó entonces para la primera iteración 73 canales para la zona 1, 96 para la zona 2 y 84 para la zona 3. Tomando las P_i^0 de un cálculo efectuado con TRISIC para el reactor de cuatro zonas se calcularon los $\overline{BU}_i^0$ a partir de los cuales se construyó un estado de quemado que las satisficiera asignando en forma lineal a cada canal un quemado comprendido entre el de entrada y el de salida. El cálculo con TRISIC permitió obtener P_i^1 a partir de los cuales se obtuvieron los $\overline{BU}_i^1$. Usando los mismos se calculó nuevamente con TRISIC. Después de este segundo cálculo se resolvió reducir el tamaño de la zona 1 y ampliar la zona 2 para aumentar de esta forma el quemado medio de la zona 1 y reducir el número de canales que superaban los 485 W/cm. Se tomaron 67 canales para la zona 1, 108 para la zona 2 y 78 para la zona 3. Usando la distribución de potencia del segundo cálculo (P_i^2) se calcularon los $\overline{BU}_i^2$ con los cuales se construyó un nuevo estado de quemado que fue calculado con TRISIC. Sin modificar las zonas se efectuó una nueva iteración con los P_i^3 y los calculados $\overline{BU}_i^3$. El proceso iterativo fue detenido por considerarse adecuada la convergencia a los fines de este trabajo. Los resultados de estos dos últimos cálculos se muestran en la tabla I.

ITERACION Nº	POTENCIA TOTAL			QUEMADOS MEDIOS		
	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3
	MW	MW	MW	MWD/TN	MWD/TN	MWD/TN
3	432,9	505,6	161,5	3938	1379	5559
4	427,4	508,4	164,2	3939	1387	5552

TABLA I: Potencias por zona y quemados para el estado en equilibrio para las dos últimas iteraciones.

Puede observarse en la Fig. 4 que las potencias totales de los canales no superan los máximos permitidos. En la Fig. 5 se puede observar la distribución de potencias específicas máximas para cada canal notándose que solo 15 canales superan los 485 W/cm. En la Fig. 6 se muestra la distribución de quemado en función del radio del núcleo. Puede agregarse por último que la reactividad calculada por el programa es equivalente al 7%.

IMPLICANCIAS ECONOMICAS DEL REACTOR DE TRES ZONAS

La importancia de la maximización del quemado de extracción reside en el hecho que el costo variable de la energía suministrada es inversamente proporcional al mismo, es decir que cuanto mayor sea el quemado, menor será el número necesario de elementos combustibles nuevos a ingresar al reactor para producir la misma cantidad de energía.

El número de elementos combustibles necesarios para un año de operación está dado por:

$$N = \frac{P_R * n * f}{BU_e * m}$$

donde:

P_R = Potencia total del reactor = 1179 MW

n = Número de días del año = 365

f = Factor de carga térmico ($0 \leq f \leq 1$)

BU_e = Quemado de extracción de los elementos combustibles,

m = Masa de uranio del elemento combustible = 0,1525 Tn.U/E.C.

Para el esquema de recambio con cuatro zonas ($BU_c = 5.640 \text{ MWd/Tn.U}$) obtenemos:

$$N_{4Z} = 500,3 \frac{\text{E.C.}}{\text{año}} * f$$

mientras que para el esquema de 3 zonas ($BU_c = 6.000 \text{ MWd/Tn.U}$) resulta:

$$N_{3Z} = 470,3 \frac{\text{E.C.}}{\text{año}} * f$$

En consecuencia, el ahorro posible por año de operación es igual a:

$$A = (N_{4Z} - N_{3Z}) * V = 30 \frac{\text{E.C.}}{\text{año}} * V * f$$

siendo V el costo del elemento combustible. Con $V = 70.582 \text{ U\$S/E.C.}$ resulta:

$$A = 2.118.863, \frac{\text{U\$S}}{\text{año}} * f$$

EL SISTEMA DE TRANSPORTE Y RECAMBIO DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES

El aumento del quemado de extracción permite disminuir en un 6% el número de elementos combustibles que deben ser enviados desde y hacia la piletta de elementos combustibles irradiados, reduciendo el uso de la botella basculante y del sistema de transporte. Debe considerarse además la reducción de la capacidad necesaria para el almacenamiento de elementos combustibles irradiados.

El inconveniente para la aplicación del esquema de recambio propuesto reside en la mayor utilización de la máquina de carga ya que por cada elemento combustible nuevo que ingresa al reactor deben efectuarse dos traslados, en lugar de uno, antes de obtener el elemento con quemado de extracción. Del aumento del 50% en el número de operaciones necesarias por recambio y la disminución del 6% en el número de recambios necesarios resulta un incremento del 41% en el uso de la máquina de carga. Esto implicará mayores costos de mantenimiento difíciles de cuantificar.

CONCLUSIONES

Hemos demostrado la factibilidad de optimizar el quemado de extracción de la Central Nuclear Atucha I mediante la modificación de los esquemas de recambio actuales por uno de un so

lo camino y tres operaciones por recambio.
Consideramos que la ventaja económica asociada al aumento del quemado de extracción compensa sobradamente los mayores costos de mantenimiento de la máquina de carga, sin embargo, antes de su ejecución deberá ser aumentada la reserva mínima de repuestos de la misma ante la mayor utilización prevista.

TAPON DE CIERRE

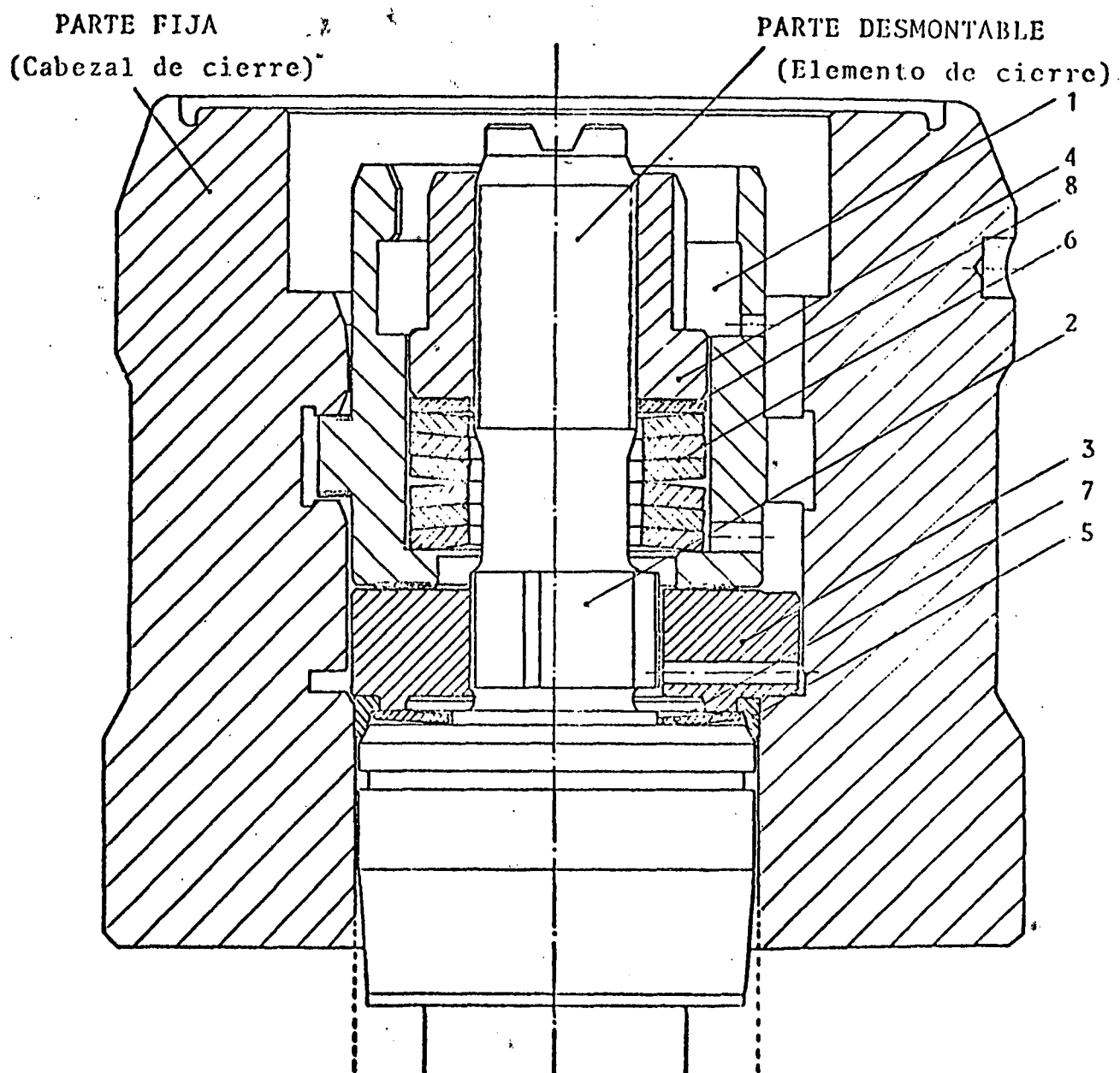


FIGURA 1

- 1 Tuerca bayoneta
- 2 Cuerpo central
- 3 Plato de fijación
- 4 Tuerca de ajuste

- 5 Anillo de cierre
- 6 Arandelas elásticas
- 7 Arandelas de fijación
- 8 Arandelas de compensación

C. L. 1008

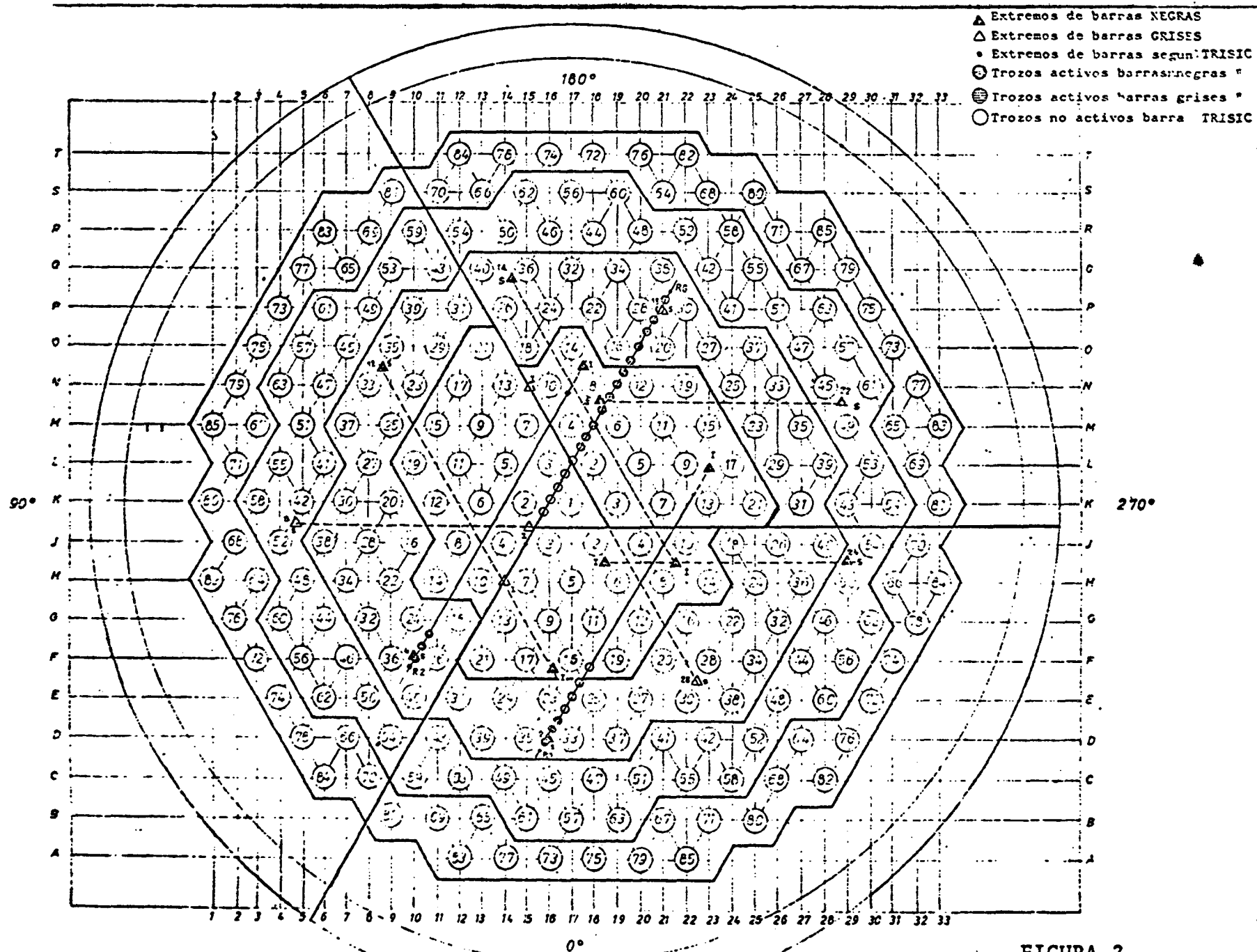


FIGURA 2

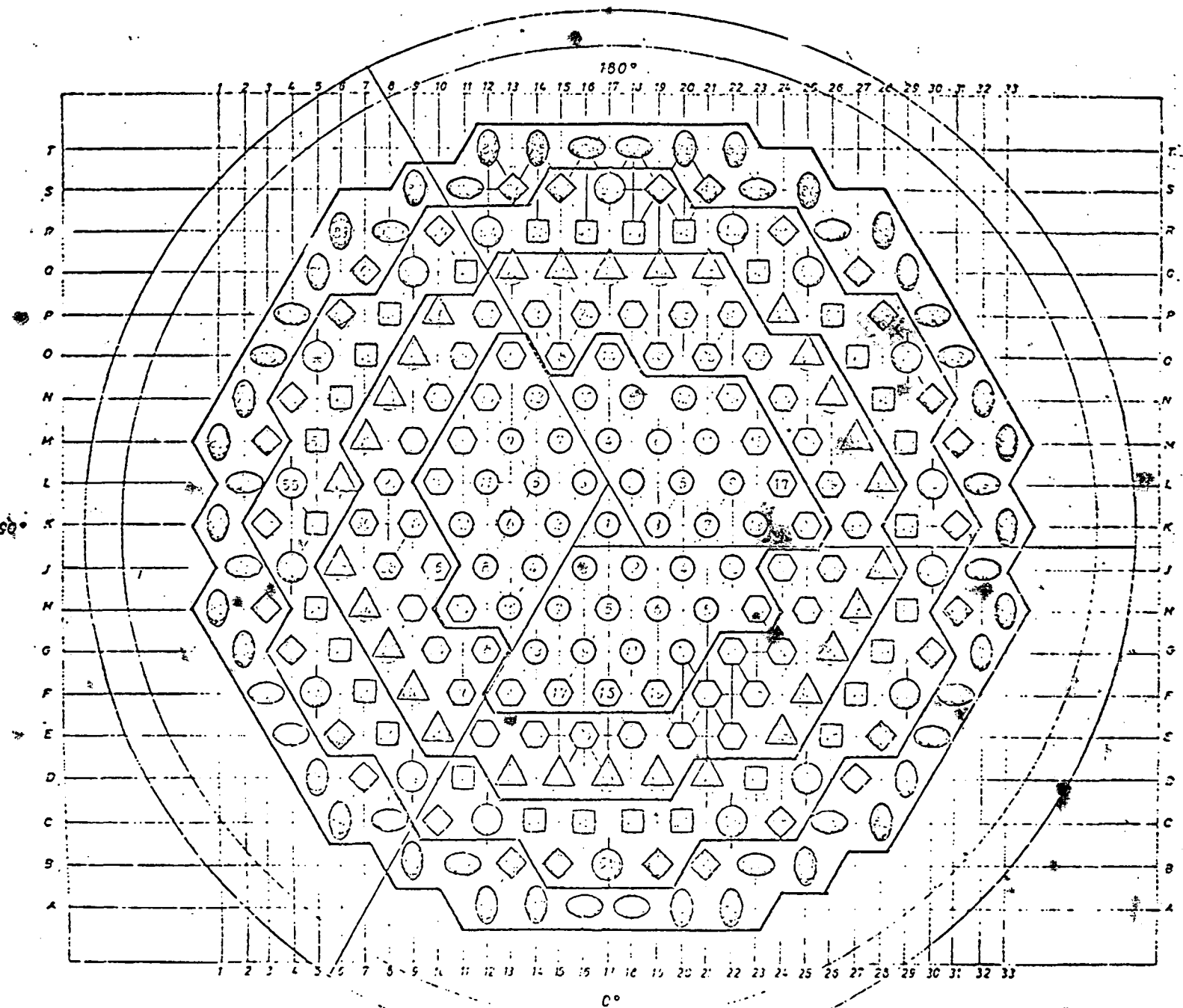
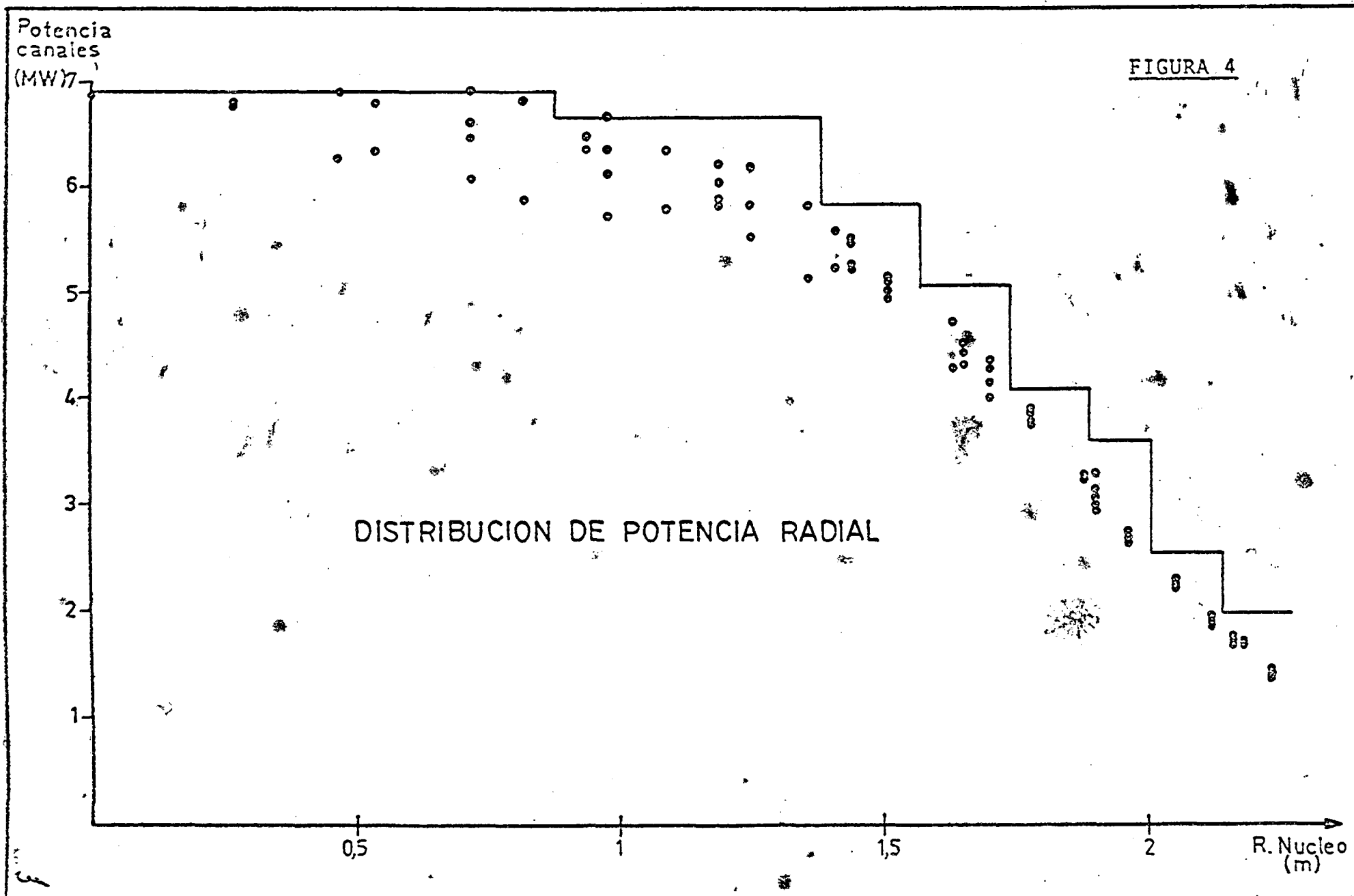


FIGURA 3



$q'_{\max.} [\frac{W}{cm}]$

$q'_{\max.} 600 W/cm$

$q'_{\max.} 531 W/cm$

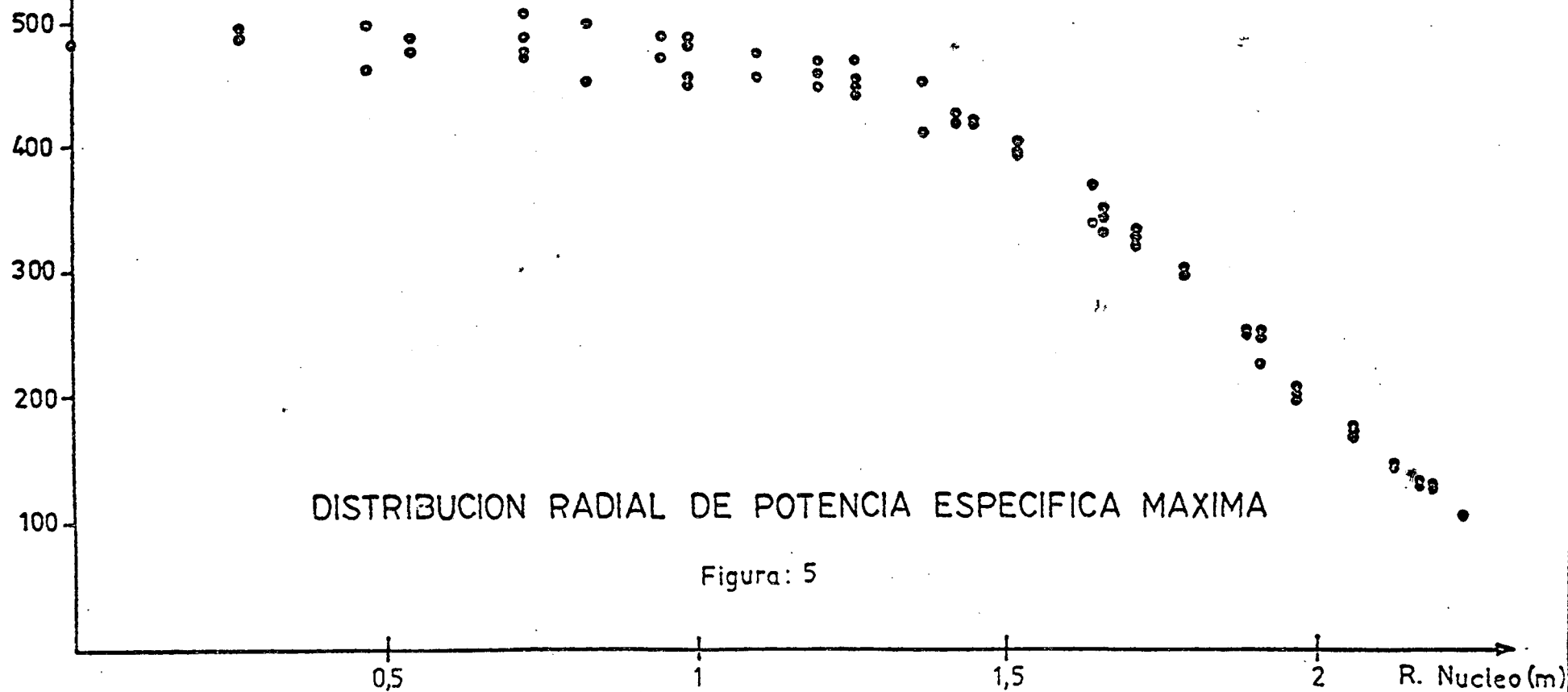


FIGURA 6

