

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
NO	1970
1	

04.70.19

4

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

SOLDADURA POR ARCO DE BARRAS COMBUSTIBLES
PARA REACTORES NUCLEARES

L.A. de Vedia, R. Gutiérrez, J. Mazza

IV Jornadas Metalúrgicas
Sociedad Argentina de Metales
Córdoba, Noviembre de 1970

Departamento de Metalurgia
Buenos Aires - Argentina

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

SOLDADURA POR ARCO DE BARRAS COMBUSTIBLES
PARA REACTORES NUCLEARES

L.A. de Vedia, R. Gutiérrez, J. Mazza

IV Jornadas Metalúrgicas
Sociedad Argentina de Metales
Córdoba, Noviembre de 1970

Departamento de Metalurgia
Buenos Aires - Argentina

Handwritten text at the top of the page, possibly a title or header.

Handwritten text in the middle of the page, possibly a main body of text or a list.

Handwritten text at the bottom of the page, possibly a signature or footer.

SOLDADURA POR ARCO DE BARRAS COMBUSTIBLES PARA REACTORES NUCLEARES

L.A. de Vedia*, R. Gutiérrez**, J. Mazza**^o

I. INTRODUCCION

La operación segura y económica de un reactor nuclear depende en gran parte del elemento combustible utilizado. Este debe cumplir con las condiciones necesarias que le permitan llegar al valor de quemado que fija su vida útil.

En un reactor nuclear, que contiene del orden de 10.000 barras combustibles, la falla de una sola de ellas puede ser causa de un percance de gran significado económico. Esto implica que los métodos de fabricación y control de las partes que constituyen el elemento combustible deban ser empleados frecuentemente en los límites de sensibilidad de la instrumentación o técnica que se utilice.

El objeto del presente trabajo ha sido establecer los métodos operativos y las condiciones de fabricación de barras combustibles para ser utilizadas en un reactor del tipo "ATUCHA". Las barras, armadas en conjunto, constituyen el elemento combustible que es introducido como unidad en el núcleo del reactor.

La barra combustible consiste en un recinto metálico estanco, en general de baja sección de captura neutrónica, que contiene en su interior el material fisionable. La estanqueidad es necesaria para impedir el escape de los productos de fisión al medio refrigerante. La configuración de la barra se indica en la Fig.1. El material de la vaina y de los tapones de cierre (Fig.2) es Zry-4, que es una aleación de Zr con 1,5% Sn; 0,2% Fe y 0,1% Cr (1). El material fisionable es dióxido de uranio (UO₂) en forma de pastillas sinterizadas (Fig.2).

Como medio de transferencia térmica entre pastillas y tubo se emplea gas helio (He) a la presión de una atmósfera absoluta. Al quedar este gas dentro de la barra terminada, se lo utiliza para evaluar la estanqueidad de la misma.

Para fabricar este tipo de barras puede recurrirse a distintos métodos (2)(3)(4)(5)(6). Para el presente trabajo fue elegido el siguiente procedimiento:

* CNEA, Gerencia de Tecnología,

** SIAM DI TELLA Ltda., División electromecánica.

^o Actualmente en CITEFA.

- Carga de pastillas en atmósfera de helio, con cierre mecánico del tubo y traspaso del mismo a la cámara de soldadura.

- Soldadura de los tapones al tubo por arco con electrodo de Tungsteno (W) y bajo atmósfera de helio.

Los métodos que pueden ser utilizados para efectuar la soldadura son:

- Soldadura por haz electrónico (7)(8). Este método tiene el inconveniente de no permitir efectuar la soldadura manteniendo el tubo lleno de gas, a lo que se suma el alto costo del equipo necesario.

- Soldadura por resistencia (9)(10). Ha tenido particular éxito la técnica conocida como "Fuerza Magnética". Este es un método de alta productividad y será empleado para algunas instalaciones de potencia. Su principal inconveniente es que no se ha desarrollado un método confiable de ensayo no destructivo, por lo que la evaluación de la fabricación debe realizarse en condiciones de servicio.

- Soldadura TIG (11)(12)(13)(14). La soldadura por arco con electrodo de tungsteno bajo gas inerte es una de las técnicas que han sido utilizadas más frecuentemente, asegurando por lo tanto la eficiencia del método. Presenta además las ventajas de poder ser realizada con equipos convencionales y ser sensible a las técnicas de ensayos no destructivos.

En base a todas estas consideraciones se ha elegido el método TIG.

La soldadura por fusión del Zry presenta el inconveniente de la alta reactividad del mismo con el N_2 , O_2 , C e H_2 , o compuestos que los contengan. La velocidad de reacción es extremadamente grande por encima de $600^\circ C$ y particularmente alta en el punto de fusión.

Cualquier contaminación superficial, en particular con N, produce efectos catastróficos en su resistencia a la corrosión.

Las especificaciones de diseño y las condiciones de servicio hacen que la fabricación deba llevarse a cabo con requerimientos particularmente estrictos en lo que se refiere a manipuleo del material, purificación de gases, tolerancias admisibles, parámetros eléctricos, mecánicos y condiciones ambientales.

II. DESCRIPCION GENERAL DEL PROCESO Y EQUIPOS

Las operaciones se llevan a cabo en un ambiente acondicionado, con control de limpieza ambiental para evitar la contaminación con polvo atmosférico. La Fig. 3 presenta una vista general del laboratorio. Los operadores efectúan las manipulaciones con guantes

de polietileno y la vestimenta es de características sanitarias.

El proceso de fabricación se describe bajo la forma de un diagrama de flujo en la Fig. 4. Se parte de tubos y barras de Zry-4 y de pastillas de UO_2 previamente inspeccionadas y listas para procesar.

II.1 Maquinado de tubos y tapones

Los tubos y tapones son maquinados por corte de viruta sin lubricación, con tolerancias y calidades según se indica en las Fig. 5 y 6. No se toman precauciones especiales excepto respecto a la acumulación de virutas por peligro de incendio. Los tubos y tapones maquinados son inspeccionados en su totalidad y se aparean de modo de obtener interferencias centradas en 0,01 mm.

II.2 Lavado de tubos y tapones

Los lavados se efectúan en bateas con agua destilada y acetona proanálisis con circulación interna (Fig. 7). Posteriormente son secados por rayos infrarrojos y enfundados en polietileno, quedando así listos para su uso.

II.3 Preparación de las pastillas de UO_2

A las pastillas de UO_2 , una vez controladas y lavadas, se les realiza una inspección visual para determinar la eventual presencia de cascaduras en el momento de armar el núcleo de la barra con la ayuda del dispositivo que muestra la Fig. 8. Dicho armado consiste en formar una columna de pastillas cuya longitud cumpla las especificaciones requeridas. Con el objeto de ajustar dicha longitud al valor necesario, se utilizan una o dos pastillas de distinto largo que las demás. La columna así formada se pesa y se seca en una estufa al vacío a una temperatura de 120°C durante dos horas (Fig. 9), retirándose en el momento de la carga.

II.4 Carga de pastillas

La carga de pastillas en la vaina se realiza dentro de una cámara de acero inoxidable diseñada al efecto (Fig. 10).

La vaina con el primer tapón ya soldado, es colocada por la parte inferior, quedando en posición vertical. El cierre estanco entre el tubo y la cámara es el mismo que se utiliza posteriormente en la cámara de soldadura a fin de evitar contaminaciones en el extremo a soldar.

Una vez colocado el tubo en posición, se coloca dentro de la cámara una bandeja con las pastillas aún calientes provenientes de la estufa, así como el tapón y el instrumental necesario. En estas condiciones se hace vacío hasta 2×10^{-2} Torr y se determina la

estanqueidad. Cuando ésta es del orden de 10^{-4} Torr.1/seg, se llena la cámara con helio hasta presión atmosférica, efectuándose tres lavados.

Se cargan luego las pastillas de UO_2 , introduciéndolas en el tubo por medio de un embudo especial (Fig. 11) a fin de evitar cascaduras y facilitar la carga. La caída de las pastillas a lo largo del tubo es amortiguada neumáticamente por el gas que éstas van desplazando en su recorrido. Una vez lleno, se limpia el extremo y se coloca un tapón de cierre mediante la ayuda de un colocador de tapones (Fig. 12). Este es un dispositivo cuya finalidad es mantener alineado el tapón con respecto al tubo durante su colocación, además de facilitar esta operación dentro de la cámara.

Una vez cargado el tubo, se lo saca de la cámara de carga y se lo ubica inmediatamente en la de soldadura, previa colocación de un enfriador. Este consiste en un manguito de cobre, partido longitudinalmente en dos, que se adosa al tubo en la zona vecina al tapón a soldar. Tiene por objeto proveer una masa de disipación térmica suficiente como para evitar la rotura de la primer pastilla debido al choque térmico provocado por la soldadura.

II.5 Cámara de soldadura

La alta pureza exigida al gas de soldadura hace necesario disponer de un recinto herméticamente cerrado. Para ello se construyó una cámara de acero inoxidable (Fig. 13 y 14) en la que el extremo a soldar penetra a través de un pasante giratorio para alto vacío a fin de permitir la fácil rotación del tubo.

La cámara cuenta, además, con conexiones de gas, vacío y acceso del electrodo. Está provista de dos visores a través de los cuales el operador puede seguir el desarrollo del proceso.

El volumen de la cámara es de 1.5 litros, teniendo la entrada de gas coincidente con el acceso del electrodo y la salida diametralmente opuesta para lograr una mejor cobertura de gas. El caudal utilizado es de 10 pies cúbicos/hora con una dada sobrepresión con respecto a la atmosférica. Para obtener esta sobrepresión se utiliza una válvula de regulación precedida por un burbujeador con aceite de alto vacío para asegurar un cierre estanco.

El cierre entre el tubo y el pasante giratorio se logra por medio de conectores a rosca realizados en teflón para evitar daños al tubo, efectuándose el cierre de vacío por medio de anillos de goma.

El pasante giratorio es accionado por un motor de CC de velocidad variable que, además de imprimir el giro necesario a la vaina durante su soldadura, permite adecuar las velocidades a las necesidades particulares de cada caso.

El pasante giratorio efectúa el cierre por medio de retenes convencionales para vacío. Los cierres de la cámara son efectuados a tope con anillos de goma a fin de lograr estanqueidad y no permitir la oclusión de gases.

El electrodo está montado en un dispositivo que permite ajustar la distancia electrodo-pieza desde el exterior, con una precisión de 0.1 mm. La estanqueidad del desplazamiento se encuentra asegurada por un fuelle metálico.

La aislación eléctrica entre el dispositivo soporte del electrodo y la cámara propiamente dicha se efectúa por medio de un buje de teflón. Todas las válvulas utilizadas son para alto vacío tipo fuelle. La estanqueidad de la cámara de soldadura en condiciones de operación es de 10^{-4} Torr. 1/seg.

La cámara consta, además, de una contrapunta a efectos de mantener centrado el tubo y el tapón durante la rotación de los mismos, manteniendo así constante la distancia electrodo-pieza. Esta contrapunta giratoria posee una pieza cilíndrica de cobre que provee un asiento cónico para las distintas mordazas que se utilizan según el tipo de tapón. A la vez provee una masa suficiente para actuar como disipador térmico.

Durante la soldadura del primer tapón, y a fin de obtener gas inerte en iguales condiciones dentro y fuera del tubo, se dispone en el otro extremo del mismo, de un segundo pasante giratorio con conexión directa al circuito de gas y vacío.

II.6 Tren purificador de gases

El gas utilizado en la cámara de soldadura se hace pasar previamente a través de un tren purificador (Fig. 15) que limita el contenido de oxígeno y de vapor de agua a menos de una parte por millón (1 ppm) a la salida del mismo. Dicho tren purificador consiste en un tamiz molecular de 800 cm^3 enfriado por nitrógeno líquido, seguido de una trampa consistente en 300 g de virutas de Zry dispuestas en un tubo de acero inoxidable a una temperatura de 750°C . La estanqueidad del sistema es de 10^{-6} Torr. 1/seg.

La tubería utilizada es de cobre, estando las distintas uniones realizadas mediante conectores para vacío con anillos de goma.

Entre la cámara de soldadura y la bomba de vacío se encuentra una trampa para vapores de aceite que funciona con una mezcla frigorífica de acetona y anhídrido carbónico. Existe una derivación desde la cámara que permite efectuar una extracción continua de gases que son analizados por sendos medidores de oxígeno y vapor de agua. Esto permite conocer durante todo el proceso el estado de pureza de los gases.

II.7 Dispositivos eléctricos

Para la soldadura TIG del Zry se utiliza corriente continua con polaridad directa, es decir, el electrodo negativo con respecto a la pieza positiva. La corriente es

provista por un generador monofásico estático MILLER Gold Star Mod. 330 en el cual se efectúa el control de corriente actuando sobre la excitación de un reactor saturable que se encuentra intercalado en el secundario del transformador.

II.7.1 Encendido del Arco:

Dada la pureza del gas helio utilizado y la característica de alto potencial de ionización del mismo, se presentaron dificultades al tratar de lograr el encendido del arco con el equipo convencional de alta frecuencia. Para solucionar este problema se modificó la fuente duplicando el número de espiras de su bobina secundaria e introduciendo en la misma un núcleo constituido por una barra de ferrita de modo de incrementar el flujo magnético. Además se incorporó, en serie con el circuito de soldadura, una fuente auxiliar de tensión continua que permite elevar la tensión de circuito abierto a un valor de 140 V. Esta fuente auxiliar deja de actuar no bien se obtiene el arranque del arco, utilizándose como señal para su desconexión la brusca caída de tensión que se produce con el encendido del mismo (15). Tiene además un temporizador que efectúa la apertura del circuito como dispositivo de seguridad en caso de falla del anterior. Como electrodo se utiliza uno de Tungsteno toriado de $\varnothing = 1 \text{ mm}$ con la punta cónica aguzada a 90° .

II.7.2 Programador de la corriente de soldadura:

La soldadura comienza con un período (AB) de calentamiento (Fig. 16), contado a partir del momento en el cual se enciende el arco y durante el cual la pieza permanece inmóvil. Al cabo del mismo se pone en movimiento el motor de giro de la vaina. Durante este giro (BC) de aproximadamente 360° , la corriente se reduce continuamente compensando la elevación de temperatura en la pieza. Al término de este giro, la pendiente de descenso de corriente se aumenta bruscamente (CD) hasta la extinción final del arco que se logra aproximadamente un cuarto de giro más tarde (D).

A fin de disponer de la flexibilidad necesaria para adaptar la soldadura a distintos tipos de tapones, se desarrolló el equipo de programación de corriente que se describe a continuación (16).

Se utilizan como señal (Fig. 18) los pulsos luminosos que se generan al girar un disco perforado solidario al pasante giratorio de la cámara de soldadura frente a una lámpara incandescente. Una vez comenzada la soldadura y superado el tiempo de calentamiento, un timer electrónico da la señal al motor que hace girar al pasante giratorio, comenzando los pulsos luminosos a ser recibidos por un detector fotoeléctrico. Este detector transforma los pulsos luminosos en señales eléctricas que son recogidas por una cadena de biestables cuya salida se convierte en una rampa decreciente de corriente en función del giro de la vaina. Dicha pendiente queda fijada por la constante de un conversor analógico digital que es ajustable desde el exterior del equipo. El ángulo de giro puede ser variado a voluntad cambiando las conexiones a las salidas complementarias de los biestables.

Cuando el circuito digital ha contado el número de pulsos correspondiente al ángulo de giro deseado, comienza el período de eliminación de cráter. Este período se genera mediante la integración de un escalón produciendo una rampa en función del tiempo que es variable con el ajuste de la resistencia de entrada al integrador. La salida de corriente de esta unidad es inyectada en la bobina de excitación del reactor saturable del generador MILLER, obteniéndose un programa análogo de corriente de soldadura.

II.8 Controles de calidad

II.8.1 Control radiográfico:

De cada una de las soldaduras realizadas se sacan dos placas radiográficas a 90° con el objeto de determinar la existencia de fisuras o poros, así como para verificar la penetración de la zona de fusión. La sensibilidad del método es del 1%.

II.8.2 Detección de pérdidas:

Los ensayos de estanqueidad se realizan por espectrometría de masas con el equipo que se muestra en la Fig.19. El mismo está calibrado para detectar fugas de helio de 3.4×10^{-8} Torr.l/seg.

II.8.3 Ensayo de corrosión:

Las soldaduras son sometidas a un ensayo de corrosión en autoclave para determinar una eventual contaminación superficial (17).

II.8.4 Control dimensional:

Se verifican los valores correspondientes al largo total de la barra y al diámetro de la soldadura.

III. DETERMINACION DE LAS CONDICIONES DE SOLDADURA

III.1 Características del arco en helio en la soldadura de Zry con electrodo de tungsteno toriado. (18)(19)

En la soldadura por arco eléctrico sin material de aporte, la transferencia de energía se realiza fundamentalmente por intermedio de los electrones que son generados en el cátodo. Para poder obtener estabilidad en el arco así producido es necesario contar con estabilidad geométrica en la columna de plasma y estabilidad eléctrica en las características del mismo.

En el fenómeno de producción de un plasma, el grado de ionización de éste depende de la intensidad de corriente eléctrica que circule o, en otros términos, la

conductividad eléctrica del plasma es una función dependiente de la temperatura (Fig. 20).

Para lograr estabilidad eléctrica es necesario trabajar en condiciones de total ionización. Esta se producirá, para el helio, a temperaturas (corrientes) más elevadas que para el argón (25.000°K para el He y 10.000°K para el Ar).

Por otra parte, la forma del electrodo debe ser tal que favorezca la estabilidad geométrica de la mancha catódica para las intensidades de corriente que van a circular. Esto fija la forma del electrodo que además debe resultar de una solución de compromiso con las condiciones necesarias para la iniciación del arco.

Dada la multiplicidad de variables que entran en juego (geometría del electrodo, conductividad eléctrica del gas, transferencia térmica, geometría del sistema, etc.), y la masa relativamente pequeña del cordón a soldar, se realizaron mediciones sistemáticas en función de los parámetros susceptibles de ser controlados.

En las Fig. 21 y 22 se indican los resultados obtenidos para la característica del arco con distintas distancias de electrodo-pieza y dos geometrías diferentes de electrodo. Las conclusiones que se obtienen son:

- a) La dispersión de valores es mayor con electrodo aguzado, lo que resulta coherente con lo que es dable esperar con el comportamiento de la mancha catódica.
- b) Las intensidades para las que se produce la estabilización del arco son menores para el electrodo cilíndrico de punta cónica (p.ej. para 1,5 mm de distancia electrodo-pieza, es de 28 A para el electrodo aguzado y de 20 A para el de punta cónica).
- c) El comienzo de la zona de inestabilidad se produce a mayores intensidades al disminuir la distancia electrodo-pieza (Fig. 23), lo que implica la necesidad de una solución de compromiso entre la facilidad de iniciar el arco y las corrientes convenientes de soldadura.
- d) Para una dada distancia electrodo-pieza, el voltaje del arco es mayor para el electrodo de extremo cónico.
- e) La función distancia vs voltaje es lineal, por lo menos desde 0,6 mm (Fig. 24). Esto demuestra la existencia de una columna de plasma independiente de la caída catódica y anódica, de modo que la fenomenología del arco se mantiene, por lo menos hasta aquél valor.

III.2 Distancia electrodo-pieza

La distancia máxima está determinada por la disposición del sistema de

operación. Para 1,8 mm o más, existe el riesgo de que el arco se establezca con alguno de los componentes que sostienen el extremo del tubo.

Distancias pequeñas exigen intensidades de trabajos mayores como se vió en párrafos anteriores, por razones de estabilidad en el arco. Además en este caso el error relativo en el control de corriente se hace mayor ya que, como se ha visto, es $V = k_1 \cdot l$ donde k_1 es una constante; V es la caída de tensión en el arco y l es la distancia electrodo-pieza.

Por otra parte, teniendo en cuenta la característica externa de la máquina de soldadura, se puede considerar en un entorno suficientemente pequeño del punto de trabajo que: $V = k_2 \cdot I$; donde k_2 es una constante e; I es la corriente de soldadura; de donde se deduce que: $dI/I = dl/l$.

Habiéndose fijado la variación dl por el error de posicionamiento del electrodo, en aproximadamente 0.1 mm, se ha adoptado una solución de compromiso entre los dos factores mencionados fijando una distancia de electrodo-pieza de 1.2 mm. Esto implica exigencias en la estabilidad de corriente de la máquina de soldadura que son analizadas más adelante.

III.3 Condiciones límites de velocidad e intensidad de corriente

Para la configuración de la pieza a soldar hay un límite mínimo de corriente fijado por la característica del arco y que, para una soldadura de calidad aceptable, determina una velocidad también mínima. De acuerdo a los valores ya analizados, esta condición está fijada por una corriente inicial de 22 A y una duración de la soldadura de 30 seg., lo que representa una velocidad lineal de 8,4 cm/min. Por otra parte, el límite máximo de velocidad, y por lo tanto también de corriente queda determinado por la estructura de solidificación resultante en esas condiciones. En efecto, se observó que, a altas velocidades se produce una estructura marcadamente columnar, con una línea de simetría circunferencial. La existencia de una interfase de esta naturaleza no resulta conveniente para las propiedades mecánicas y metalúrgicas requeridas. Dichas velocidades máximas son del orden de 2 seg/rev, lo que significa una velocidad lineal de 100 cm/min e implican una corriente inicial de aproximadamente 37 A.

De acuerdo a estas determinaciones iniciales, para los ensayos de puesta a punto se seleccionó una velocidad intermedia de 21,5 cm/min (9 seg/rev), alrededor del cual se realizaron las experiencias. La soldadura presenta así condiciones metalúrgicas adecuadas, Fig. 25, 26, 27 y 28 (20), y se trabaja en una zona de la característica del arco suficientemente alejada de la inestabilidad.

III.4 Programa de corriente de soldadura

El programa de corriente de soldadura responde a las siguientes necesidades (Fig. 16 y 17):

- a) Período de calentamiento a corriente constante (AB). Es necesario para obtener la masa fundida inicial que se mantendrá en equilibrio dinámico durante el resto de la soldadura. Todos los valores de corriente que se mencionan en el texto se refieren a este período.
- b) Disminución de corriente en función del giro de la pieza para compensar la elevación de temperatura durante el transcurso de la soldadura (BC).
- c) Disminución final de la corriente para evitar la formación de un cráter en el momento de interrupción del arco por desconexión de la alimentación (CD).

III.5 Sistemática de los ensayos

Los ensayos se efectúan evaluando parámetros que determinan la calidad de la soldadura. Estos son:

- a) Geometría de la soldadura en la interfase interna tubo-tapón. Se establece como referencia la geometría que se indica en la Fig. 29 por razones mecánicas y metalúrgicas con el criterio de evitar entalladuras y lograr una soldadura sana.
- b) Sobremona o diámetro externo de la soldadura. Por diseño queda fijado el diámetro del tubo y de la soldadura con sus tolerancias.
- c) Uniformidad del cordón de soldadura. Para asegurar la calidad uniforme de la soldadura se requiere una programación adecuada que asegure las condiciones establecidas en el párrafo a).
- d) Tamaño del cráter. La finalización de la soldadura no debe producir discontinuidades en el cordón que puedan ser causas de defectos mecánicos o den origen a centros de corrosión preferencial.

La calidad de la soldadura obtenida de acuerdo con los parámetros citados se analiza en función de las siguientes variables:

- a) Variables geométricas
 - Diámetro máximo del tapón
 - Diámetro externo del tubo dentro de las tolerancias especificadas
 - Interferencia o juego entre tapón y tubo
- b) Variables de soldadura
 - Velocidad
 - Intensidad de corriente
 - Programa de corriente

El método utilizado consistió en analizar una dada población de soldaduras en

un entorno de cada una de las variables mencionadas. Los resultados fueron obtenidos por el análisis de los diagramas de frecuencia o de correlación y se indican en las Fig. 30, 31, 32 y 33.

Dada la complejidad del sistema y la eventual interdependencia de variables, es posible mediante este método discriminar el efecto de las mismas sobre los parámetros de soldadura. Las conclusiones que se obtienen son las siguientes.

Dentro del entorno examinado y como resultado del examen de las figuras mencionadas, surge la necesidad de mantener la velocidad de soldadura en $6.8 \text{ rev/min} \pm 3\%$ y la intensidad de corriente en $25 \text{ A} \pm 1.6\%$ para evitar el riesgo de una sobresoldadura que puede traer aparejada la perforación del tubo e inutilización del mismo, no existiendo en cambio relación con la posición en la cual se inicia la disminución final de corriente que a estos fines puede fijarse con un avance de $23^\circ \pm 12^\circ$ antes de completar la revolución.

Estas condiciones requieren alimentar el equipo de soldadura con tensión estabilizada en un 2%, ajustándose en cada caso las características de la máquina por calibración previa mediante una resistencia externa (Fig. 34 y 35). Debe hacerse notar que estas consideraciones exigen constancia de todos los elementos del circuito (p.ej. cambios en la longitud o diámetro de los conductores afectan los valores establecidos mas allá de las tolerancias admisibles).

Del gráfico de sobremonta en función de la velocidad a corriente constante (Fig. 33) se obtiene como conclusión que conviene trabajar con velocidades lentas que ofrezcan un adecuado margen de seguridad. Además se ha observado que variaciones de hasta 0,1 mm en el diámetro máximo del tapón no afectan la sobremonta.

Hacia el final de la ejecución del cordón de soldadura se producen, eventualmente, una o dos pequeñas ondulaciones de algunas centésimas de milímetro de espesor que, de acuerdo con las Fig. 36, 37 y 38 no presentan correlación con los parámetros de soldadura. Se presume que podrían hallarse relacionadas con la acumulación de gases en la interfase tapón-tubo.

La interferencia entre tapón y tubo debe ser la suficiente como para asegurar una estanqueidad de $10^{-1} \text{ Torr.l/seg}$, que permita el traspaso del tubo de la cámara de carga a la de soldadura, pero no superior a 0,020 mm pues ofrece problemas en la colocación del tapón con riesgo de abocardado en el tubo. Por otra parte, la existencia de juego trae aparejado el riesgo de perforación durante la soldadura debido a una mala transmisión de calor entre tapón y tubo. De acuerdo a estos criterios se adopta como valor nominal de interferencia 0,010 mm.

III. 6 Purificación de gases

El gas utilizado contiene inicialmente 50 ppm de impurezas totales, las que resultan excesivas para las necesidades de la soldadura requeridas por el ensayo de

corrosión en autoclave. A fin de reducir dicho valor, se hace pasar el gas a través del tren purificador ya descrito.

Se realizaron mediciones a efectos de determinar la temperatura óptima de trabajo de las virutas de Zry, estando la temperatura máxima limitada por el riesgo de formación de un eutéctico Zry-inoxidable a aproximadamente 900°C.

Se verificó, para los caudales empleados, que la trampa de Zry comienza a ser efectiva a partir de los 600/650°C, detectándose para esas temperaturas contenidos de oxígeno inferiores a 1 ppm (Fig. 39). Se adoptó entonces 750°C como temperatura de trabajo, dentro de los límites mencionados.

Dado que el gas permanece en el sistema durante los períodos de inactividad, que se estimaron en un máximo de 50 horas y asumiendo difusión de oxígeno hacia el interior del sistema, se obtiene -considerando el volumen del mismo y el nivel máximo permisible de contaminación- que la estanqueidad mínima necesaria es de 10^{-6} Torr. l/seg.

Durante la soldadura se produce un depósito en las partes frías de la cámara, observándose también posteriormente a la extinción del arco, en ciertas zonas del tubo a medida que éste se va enfriando. Se determinó la composición cualitativa del mismo mediante un análisis con microsonda electrónica (21) sobre un sustrato adecuado. Para ello se utilizó acero inoxidable que constituye la mordaza del extremo del tubo.

Las determinaciones mostraron la eventual presencia de C y Si provenientes del uso de grasas o aceites de alto vacío en lugares expuestos a radiación, ya sea del arco o del horno del tren purificador. Para reducir la contaminación es necesario el uso de pantallas adecuadas o evitar el empleo de dichas grasas o aceites, cuando ello sea posible. No obstante, el depósito sigue produciéndose pero su composición es entonces de Zr y Sn con alta concentración de éste último proveniente de la volatilización del mismo por el arco. En estas condiciones no se detectó: W, C, Si, Th, Cu, Zn.

El depósito mencionado implica la necesidad de una limpieza periódica de la cámara para evitar problemas en el degasado así como la limpieza mecánica del extremo del tubo luego de la soldadura.

III.7 Lavados en la cámara de soldadura

Siendo el volumen de la cámara de soldadura de 1,5 litros y admitiendo un contenido máximo de impurezas totales de 20 ppm para el gas dentro de aquélla, resulta que para un caudal de helio de 0,075 l/seg ($10 \text{ pies}^3/\text{h}$), no deben ingresar al sistema más de $1,5 \times 10^{-6}$ l/seg de impurezas, lo que representa una estanqueidad de $1,15 \times 10^{-3}$ Torr. l/seg. Por otra parte, el criterio de seguridad adoptado para obtener mediante lavados, un contenido total de impurezas inferior a 20 ppm, es el siguiente. A partir de un valor inicial de vacío de 2×10^{-2} Torr, se efectúa un primer lavado con

helio que diluye el contenido total de impurezas a 2.7×10^{-6} ppm y un segundo lavado a 3.4×10^{-9} ppm, lo que se ha calculado suponiendo que el gas que entra a la cámara no trae impurezas.

El tiempo que permanece en vacío en cada ciclo es de dos minutos, de modo que la estanqueidad necesaria será aquélla que impida una impurificación mayor de 20 ppm en ese lapso, o sea 1.8×10^{-4} Torr.l./seg. En caso contrario, los lavados no representan una ventaja frente a la acción del vacío.

Debe observarse que los valores de estanqueidad referidos son debidos fundamentalmente a degasado. Se ha observado, por otra parte, que el helio ejerce una acción muy efectiva sobre el degasado, mejorando muy rápidamente la estanqueidad del sistema.

Como conclusión se adopta el criterio de efectuar un primer vacío de 2×10^{-2} Torr durante el tiempo necesario para obtener una estanqueidad de 2×10^{-4} Torr.l./seg, efectuándose luego dos lavados.

Para la soldadura del segundo tapón, resulta difícil llegar a los valores de estanqueidad mencionados, por lo que se efectúa un vacío hasta 2×10^{-2} Torr para asegurar la pureza inicial.

Siendo la estanqueidad del segundo tapón de 10^{-1} Torr.l./seg y la capacidad del gas dentro de la barra de 12 cm^3 , el tiempo que se demora en evacuar a esta última es de 91 seg, es decir que la totalidad del gas es desalojado durante los dos minutos que permanece en vacío hasta llegar a 2×10^{-2} Torr. Luego se efectúan los dos lavados con helio.

Para asegurar el equilibrio de presión entre el interior de la barra y la cámara de soldadura, se la mantiene bajo gas durante un tiempo equivalente al de vacío, pues de otro modo, la perforación del tubo durante la soldadura se produce casi inevitablemente.

IV. CONCLUSIONES

La operación segura de un reactor nuclear requiere elementos combustibles de alta confiabilidad, constituyendo la soldadura una de las etapas críticas de su fabricación.

El Zry-4 puede soldarse sin dificultades por arco, con electrodo de tungsteno y bajo gas inerte. La confiabilidad está en este caso determinada por las precauciones que deben tomarse durante el proceso. Ellas son:

- a) Cuidadosa limpieza y manipuleo durante las operaciones.
- b) Condiciones reproducibles de soldadura.
- c) Ensayos de fabricación adecuadamente sensibles.

La reproducibilidad de la soldadura requiere condiciones de trabajo específicas

19. HEMMONS, Howard W. Recent Developments in Plasma Heat Transfer. Ibele-Modern Developments in Heat Transfer, P. 401, Academic Press, 1963.
20. GIORSETTI. Comunicación Interna (ARA).
21. LIBANATI, ESPEJO. Comunicacion Interna (CNEA).

INDICE DE ILUSTRACIONES

- Fig. 1 Esquema de una barra combustible.
- Fig. 2 Foto de una pastilla, tapón, tubo y barra soldada.
- Fig. 3 Foto general del Laboratorio.
- Fig. 4 Diagrama de flujo del proceso de fabricación.
- Fig. 5 Detalle del maquinado de los tubos.
- Fig. 6 Detalle del maquinado de los distintos tipos de tapones.
- Fig. 7 Foto de las bateas de lavado de tubos.
- Fig. 8 Foto del dispositivo para armado de columnas.
- Fig. 9 Foto de la estufa de secado de pastillas.
- Fig. 10 Esquema de la cámara de carga.
- Fig. 11 Foto de la carga de pastillas en la cámara.
- Fig. 12 Esquema del colocador de tapones.
- Fig. 13 Esquema de la cámara de soldadura.
- Fig. 14 Foto de la cámara de soldadura.
- Fig. 15 Esquema del tren purificador de gases.
- Fig. 16 Programa ideal de corriente de soldadura.
- Fig. 17 Registro real de un programa de corriente.
- Fig. 18 Diagrama de bloques del programador de corriente.
- Fig. 19 Foto del equipo para detección de pérdidas.
- Fig. 20 Conductividad eléctrica del helio en función de la temperatura.
- Fig. 21 Característica del arco de helio c/electrodo aguzado.
- Fig. 22 Característica del arco de helio c/electrodo de extremo cónico.

- Fig. 23 Curva de estabilidad del arco en función de la distancia electrodo-pieza.
- Fig. 24 Tensión del arco en función de la distancia electrodo-pieza.
- Fig. 25 Corte tapón soldado.
- Fig. 26 Zona de fusión.
- Fig. 27 Zona afectada por el calor.
- Fig. 28 Zona no afectada por el calor.
- Fig. 29 Esquema de la interfase tapón-tubo.
- Fig. 30 Sobresoldadura o falta de penetración en función del tiempo de soldadura.
- Fig. 31 Sobresoldadura o falta de penetración en función de la corriente.
- Fig. 32 Sobresoldadura o falta de penetración en función de la posición de comienzo de eliminación de cráter.
- Fig. 33 Sobremona en función del tiempo de soldadura.
- Fig. 34 Característica externa del generador sin resistencia externa.
- Fig. 35 Característica externa del generador con resistencia externa.
- Fig. 36 Ondulaciones en función de la posición de comienzo de la eliminación del cráter.
- Fig. 37 Ondulaciones en función del tiempo de soldadura.
- Fig. 38 Ondulaciones en función del producto $I \cdot t$.
- Fig. 39 Cantidad de oxígeno en función de la temperatura de la trampa en el gas de la soldadura.

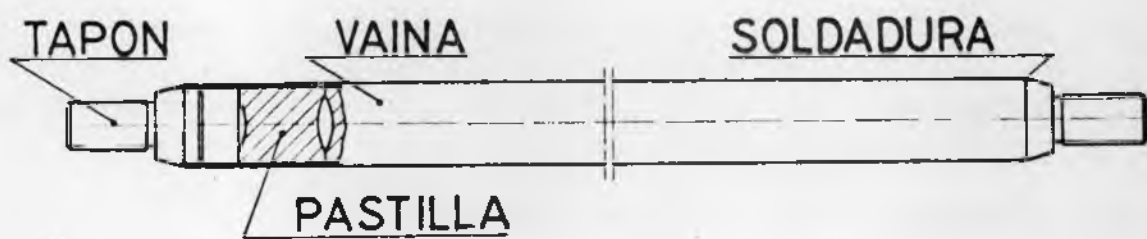


Figura 1

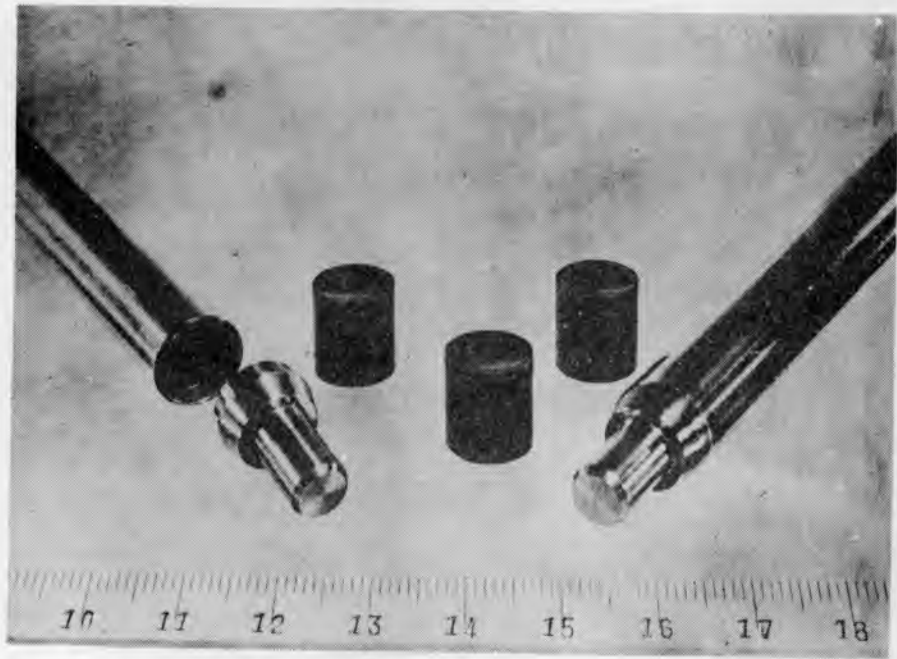


Figura 2

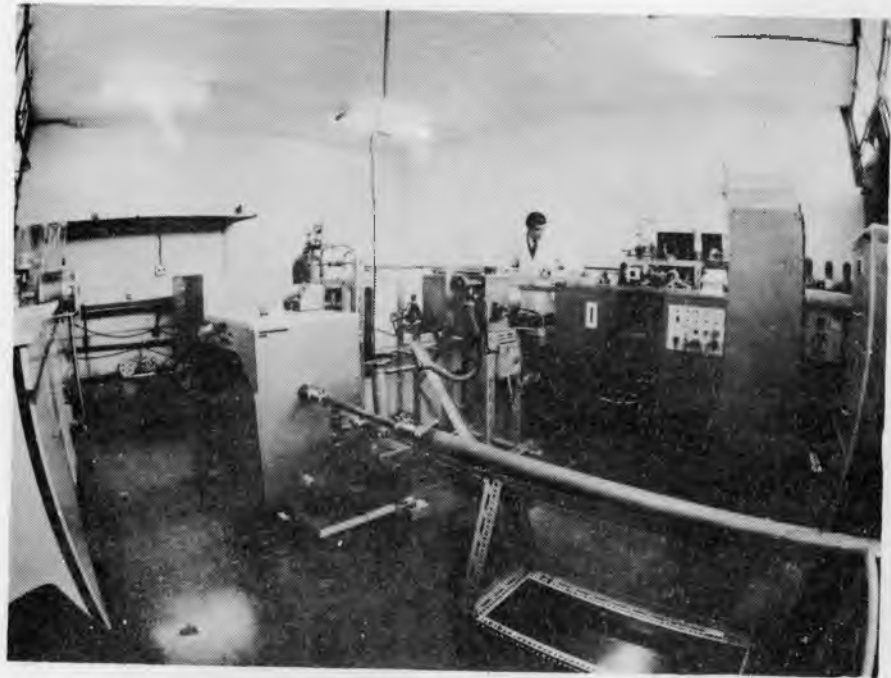


Figura 3

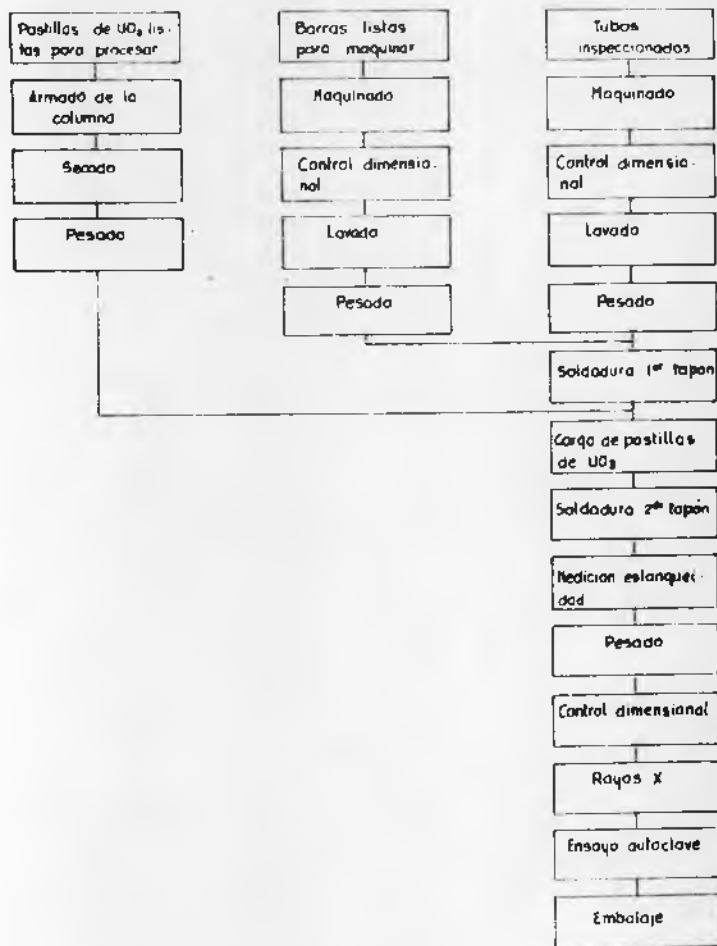


Figura 4

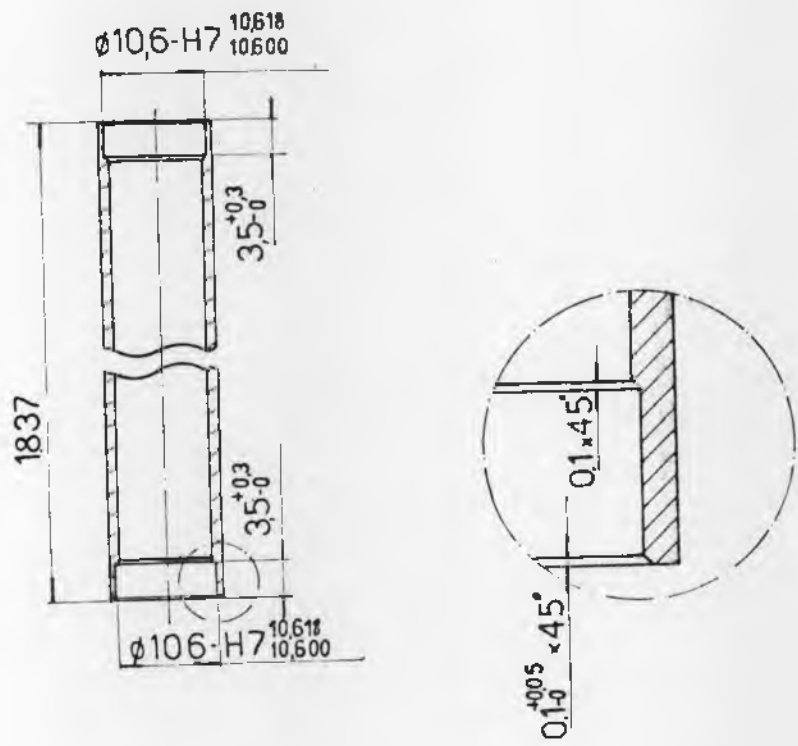


Figura 5

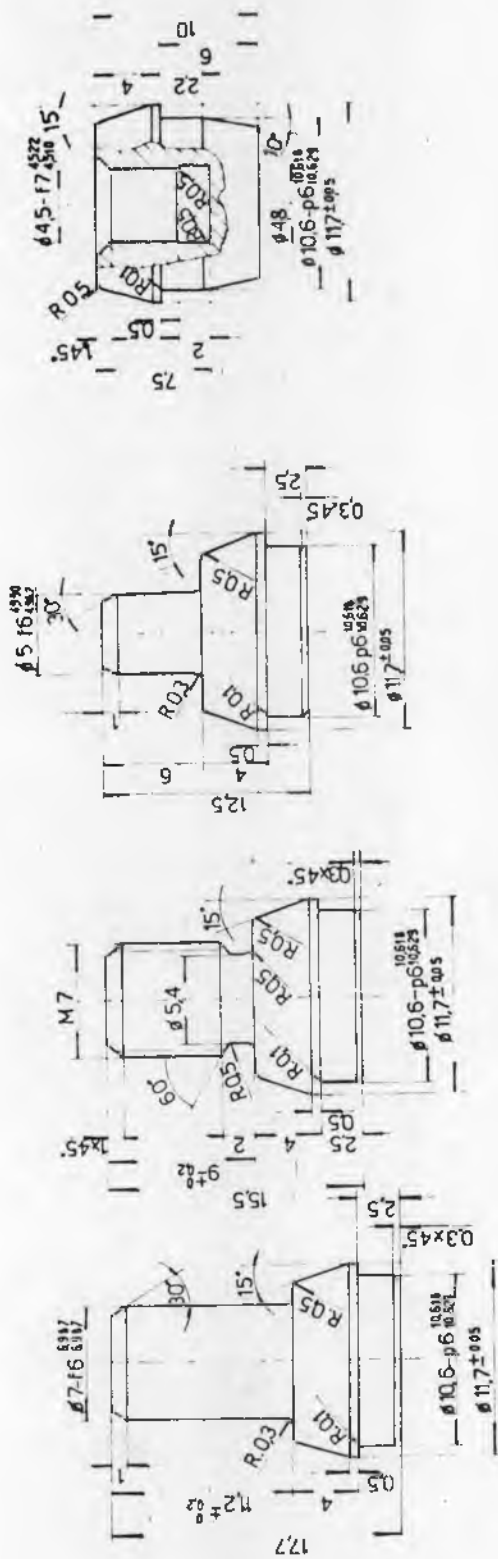


Figura 6



Figura

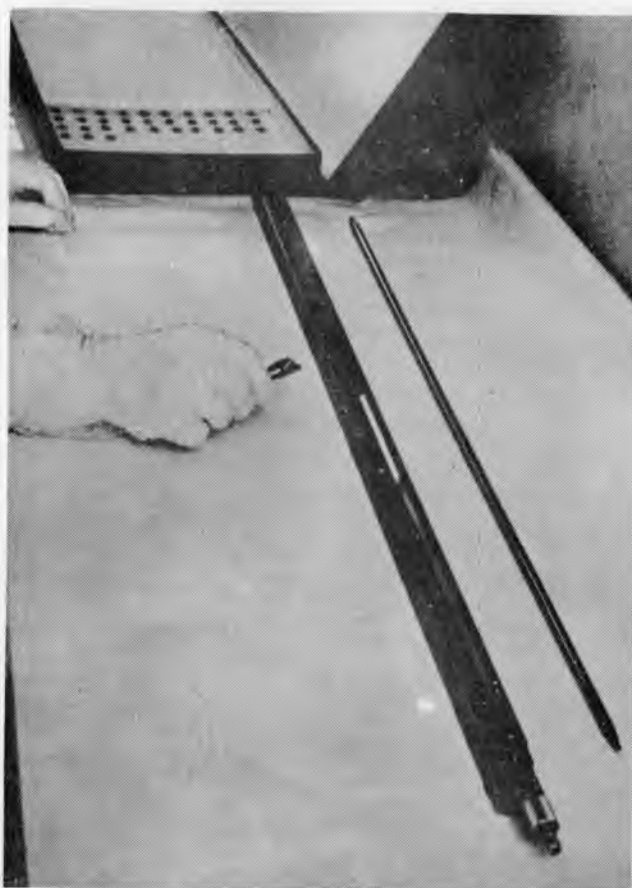


Figura 8



Figura 9



Figura 11

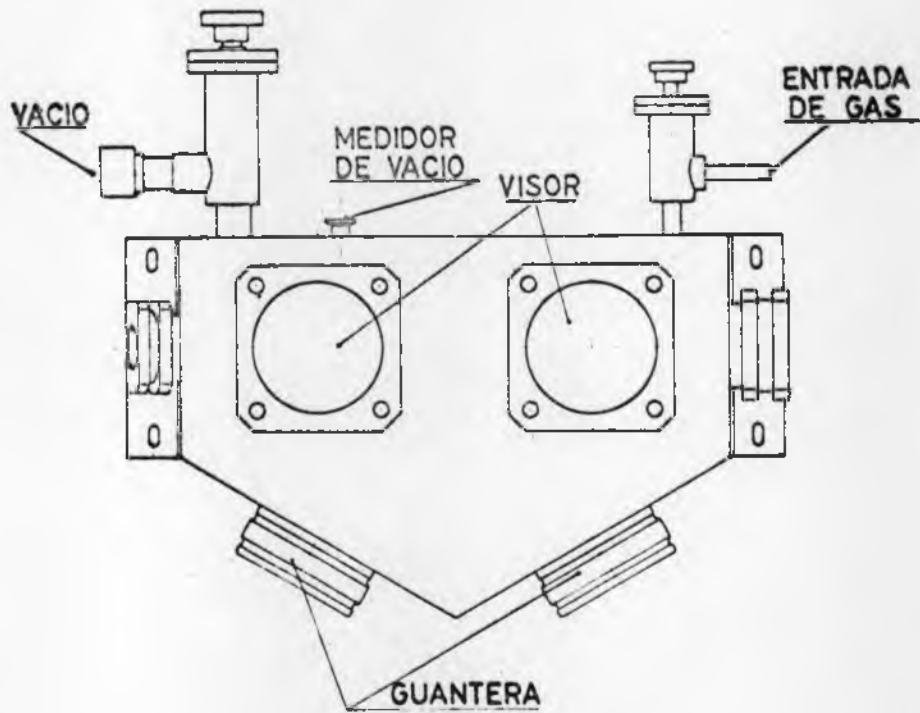
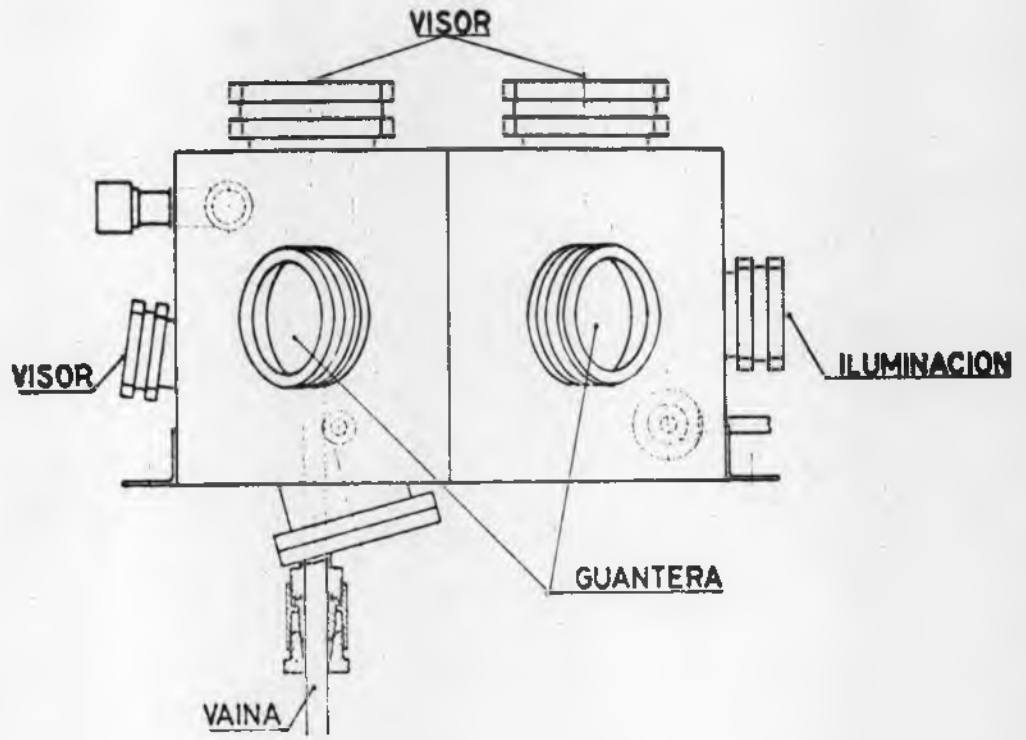


Figura 10

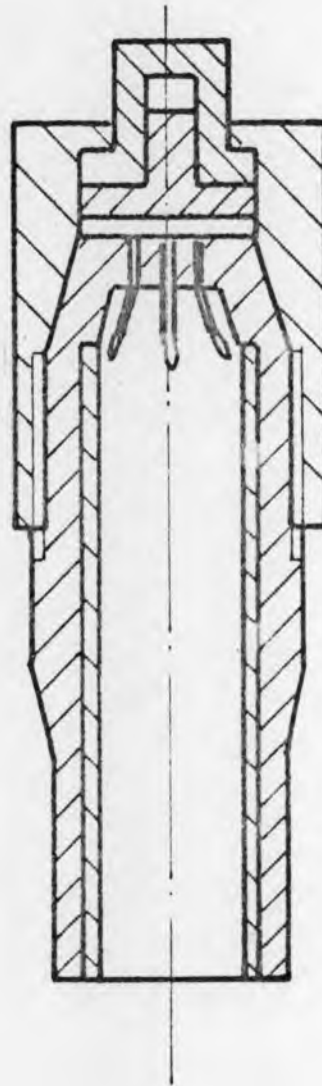


Figura 12

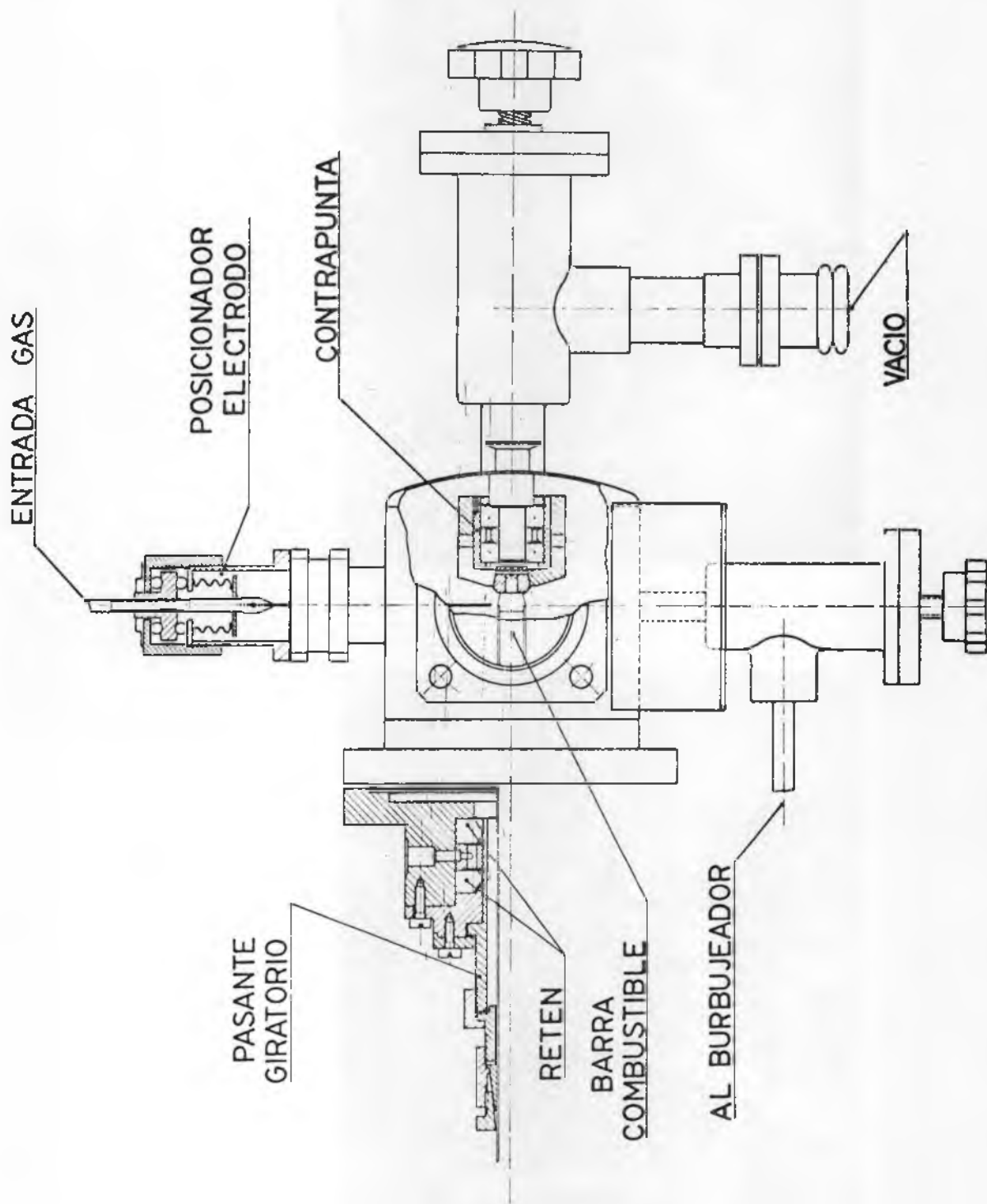


Figura 13

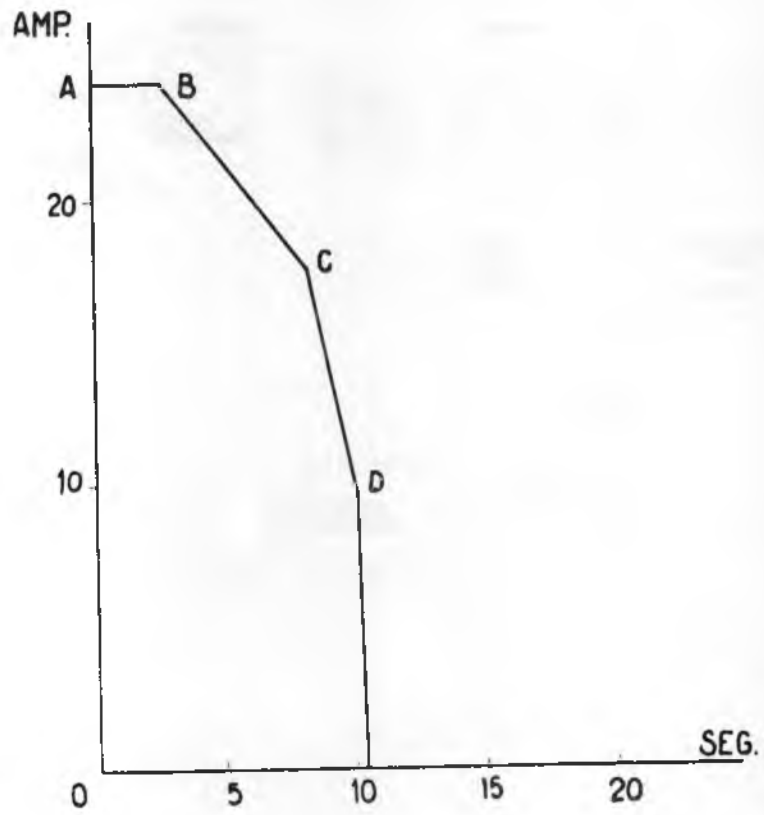


Figura 16

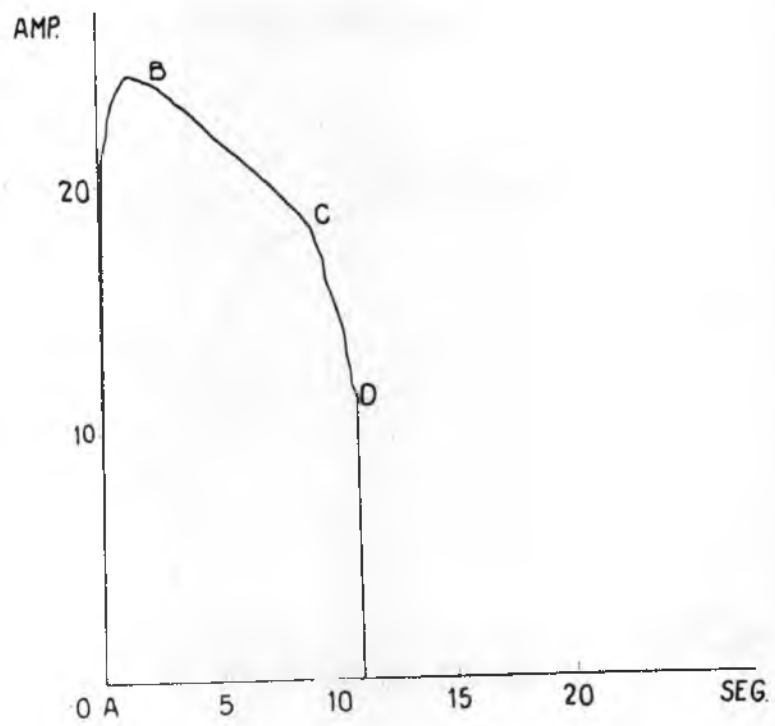


Figura 17

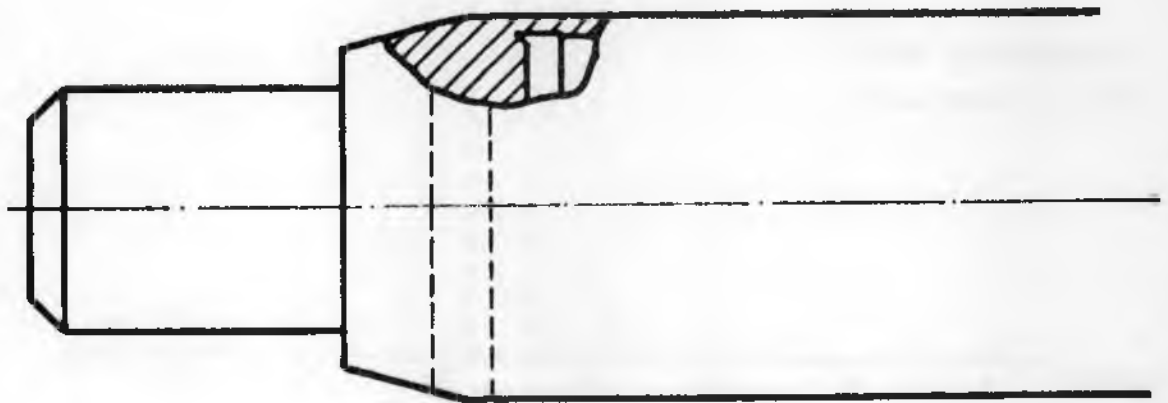


Figura 29

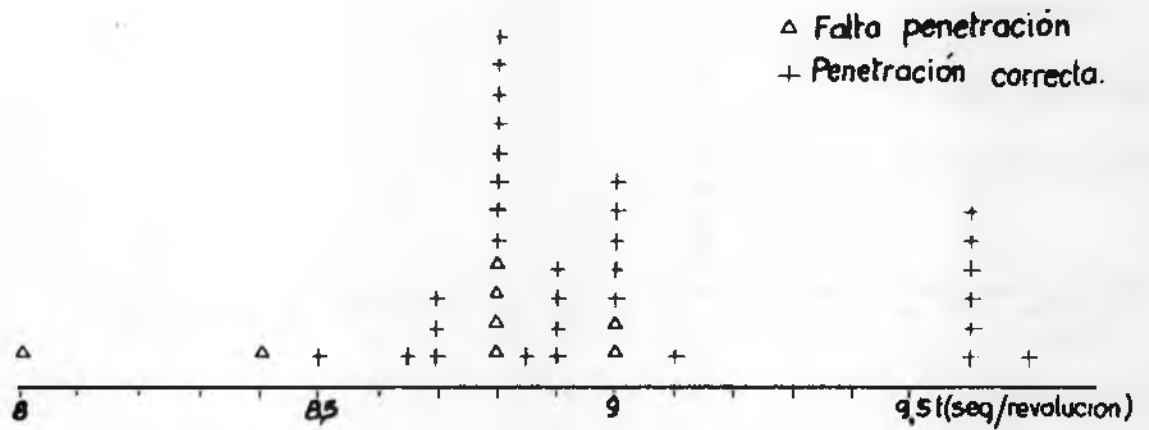


Figura 30

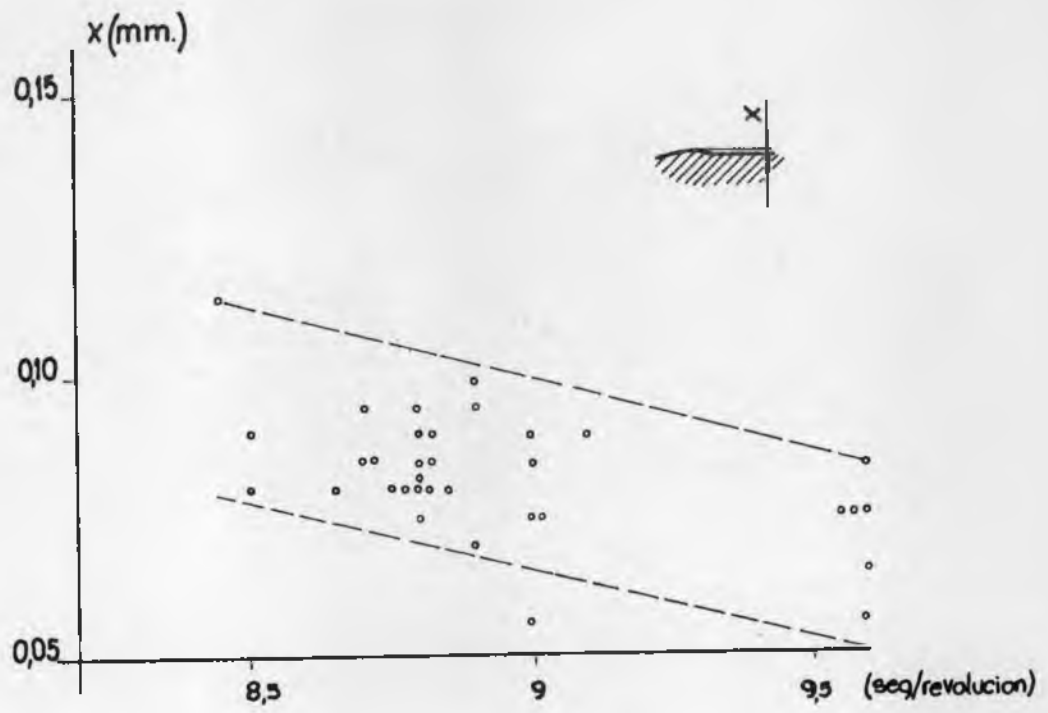


Figura 33

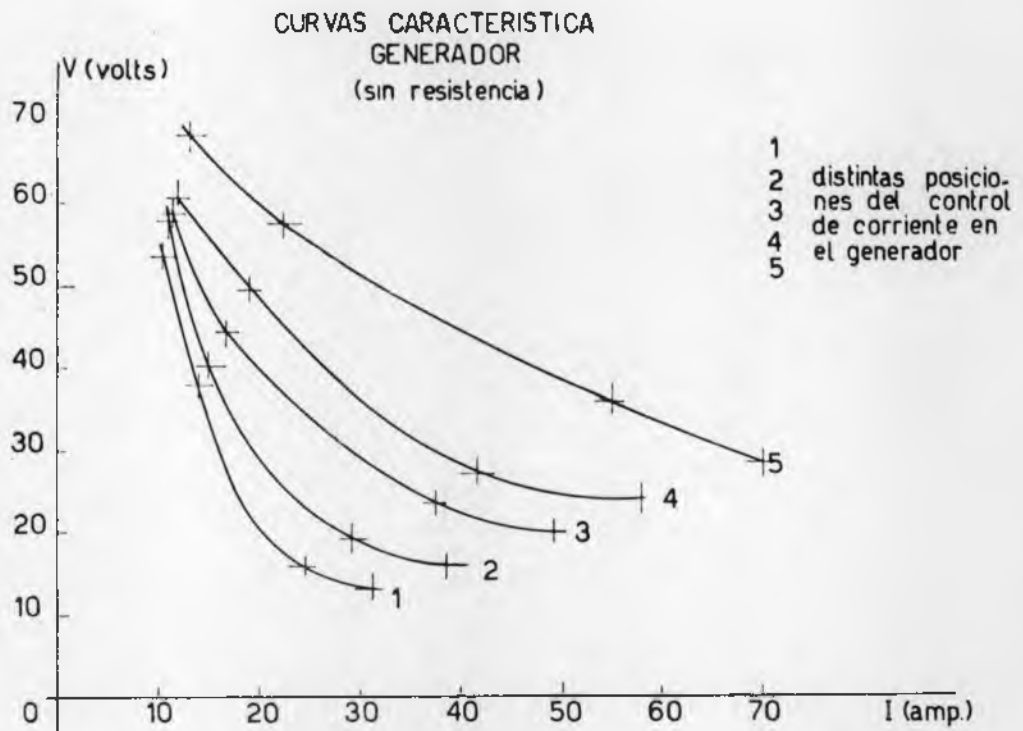


Figura 34

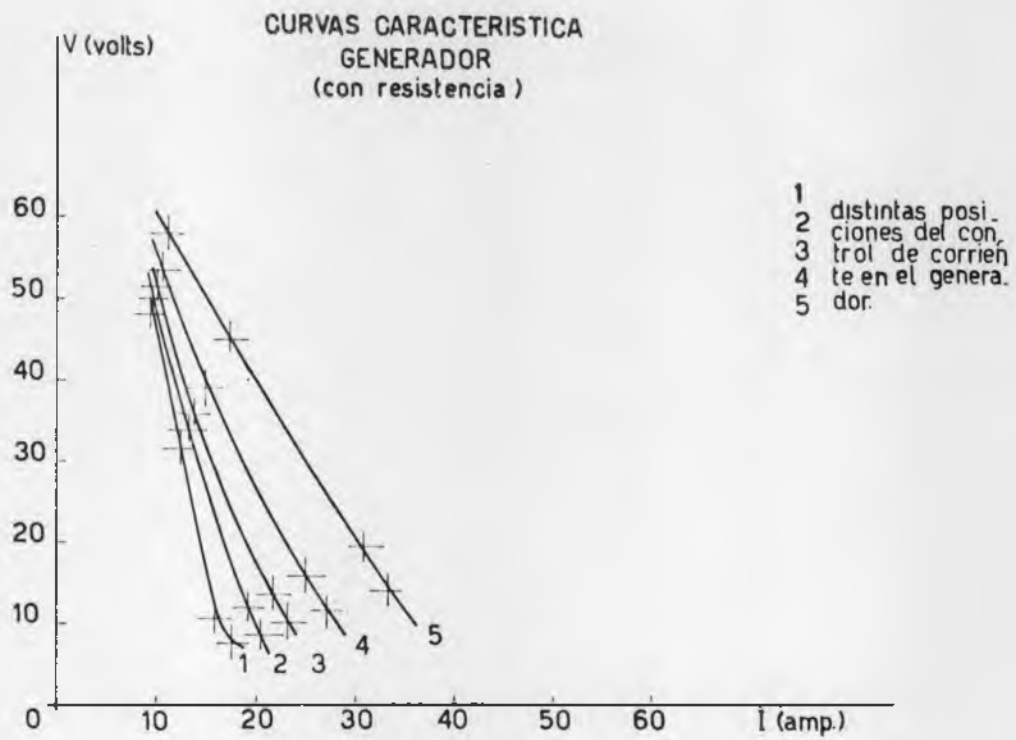


Figura 35

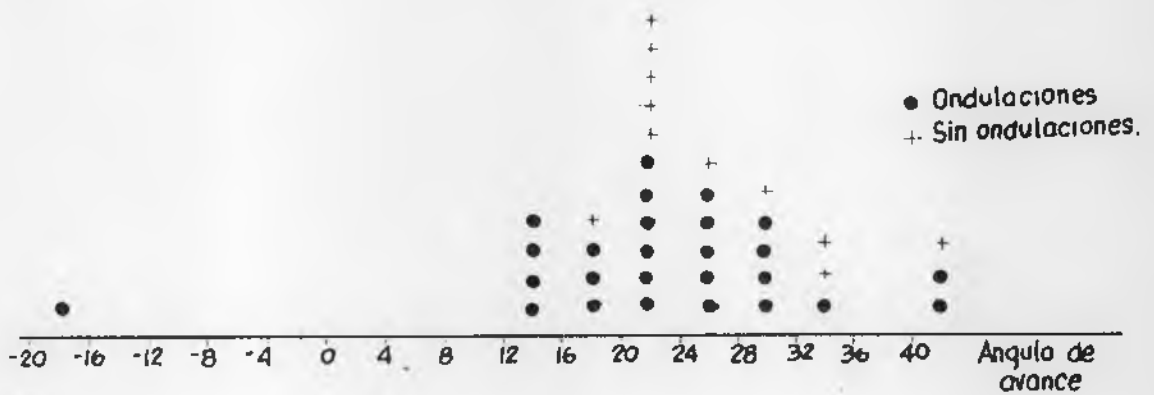


Figura 36

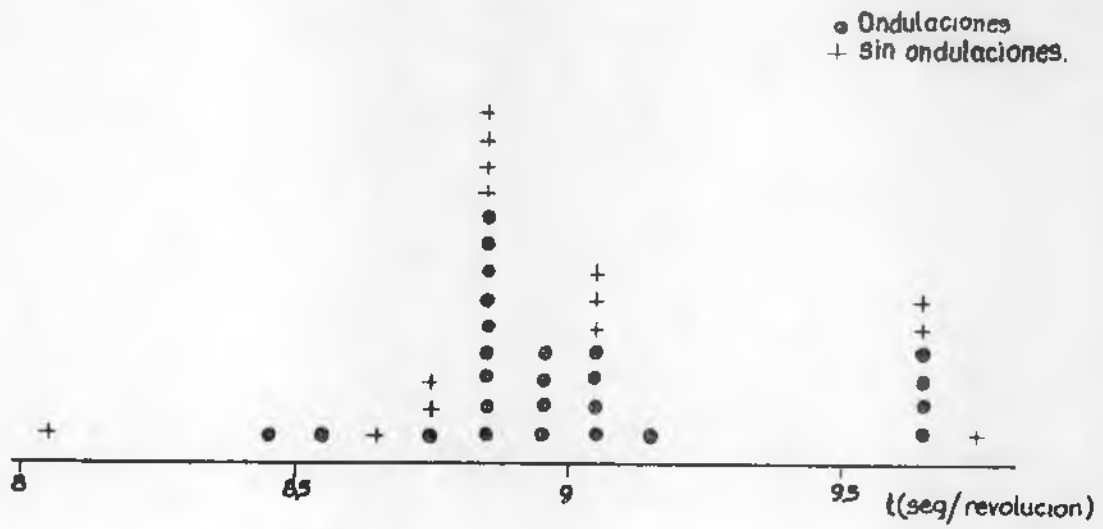


Figura 37

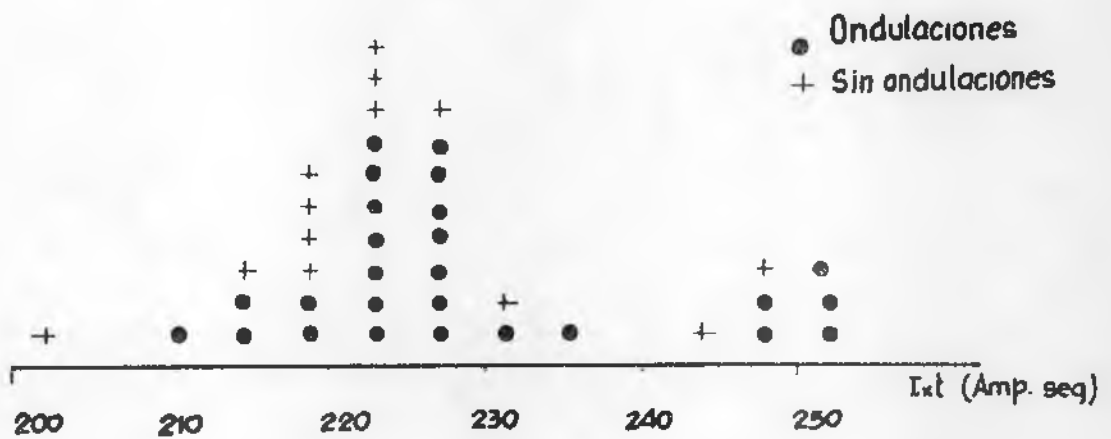


Figura 38

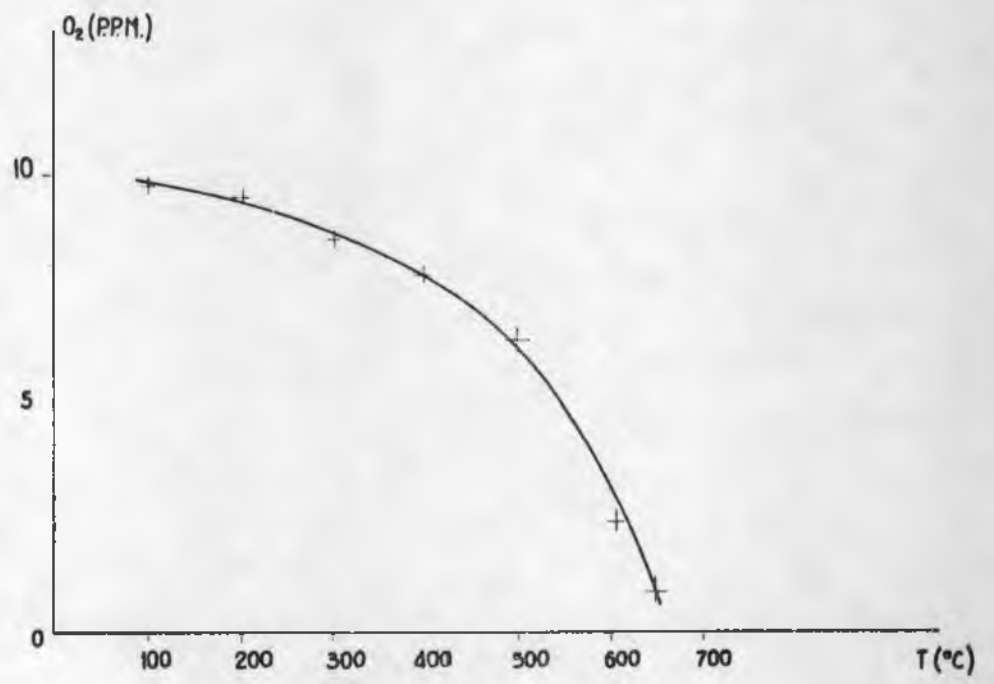


Figura 39