

09.61.06

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº	AÑO
1	1961

REPUBLICA ARGENTINA

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

CURSO DE APLICACION DE RADIOISOTOPOS

DESCRIPCION Y CARACTERISTICAS DEL EQUIPO
PARA MEDICION DE ESPESORES MODELO RI - BETA 1,
SERIE 001, PRODUCIDO POR LA
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

Antonio Castagnet, Héctor Gómez, Manfredo Koepf y Miguel Viglioglia

RI - 25

DESCRIPCION Y CARACTERISTICAS DEL EQUIPO PARA MEDICION DE ESPESORES

MODELO RI - BETA 1, SERIE 001, PRODUCIDO POR LA

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

Antonio Castagnet Miguel Viglioglia Manfredo Kopp Héctor Gómez

1 - GENERALIDADES

Se trata de un equipo que emplea el método de absorción de partículas beta para determinar el peso por unidad de área de materiales laminados.

Al interponer una hoja delgada de un cierto material entre un emisor beta y un detector, se produce la atenuación de los electrones antes detectados por interacción con la materia que atraviesa en su pasaje.

Sin entrar a analizar estos fenómenos de interacción nos referiremos directamente a las conclusiones prácticas de ese hecho.

En primer lugar la absorción, aproximadamente, no depende de la naturaleza del material interpuesto sino de los gr/cm^2 que caracterizan la hoja. En segundo término se comprueba la existencia de un límite que puede expresarse en peso por unidad de superficie, más allá del cual son detenidas todas las partículas beta del espectro continuo de energías emitido por un radioisótopo determinado.

La función que liga la intensidad de transmisión de partículas beta del C^{14} con los gr/cm^2 de absorbente, está expresada por la curva de la figura 1 y de su forma se deduce que hasta cierto límite es posible usar la absorción de esas partículas beta como un método para medir espesores, en especial de materiales livianos.

Es así que el presente equipo se diseñó para usarse en papel celofán, papel y plásticos laminados con un peso de hasta 80 gramos por metro cuadrado, en cuyo caso el error de lectura es ya del 1.2% aproximadamente.

El detector es una cámara de ionización que expresa en términos de intensidad de corriente la cantidad de partículas beta detectadas.

La medición de espesores o más bien del peso por unidad de superficie de los materiales laminados sujetos a la calibración, se efectúa en forma diferencial, restando por oposición las intensidades de corriente que corresponden a una muestra standard y al producto que se está manufacturando.

La diferencia que resulta de esta comparación es amplificada por un micro-micro amperímetro y registrada gráficamente en forma continua.

Quiere decir entonces que en realidad se miden desviaciones porcentuales respecto a un valor standard. Cuando se superan las tolerancias preestablecidas accionan señales dispuestas en los paneles de control y la corrección puede hacerse si se quiere en forma automática mediante servo mecanismos.

Interesa conocer la constante de tiempo del equipo o velocidad de respuesta, que es el tiempo durante el cual el circuito electrónico discrimina una lectura.

Este puede condicionarse a los requerimientos de cada caso particular, pudiendo variar desde décimas de segundo a más de un minuto. La lectura será la medida promedio del material elaborado durante el intervalo de la respuesta.

Así, para el papel que se fabrica a 150 m/min. en la continua, no sería conveniente usar una constante de tiempo muy pequeña, pues el hecho de que una falla localizada exceda las tolerancias no significa que deba corregirse la alimentación de la máquina.

Por esta circunstancia la medida del espesor se integra y promedia a lo largo del papel elaborado en 20 seg y el registro gráfico indica entonces la tendencia de la máquina a producir en más o en menos respecto al valor standard, permitiendo las correcciones del caso.

El equipo para medición de espesores producido por esta Comisión Nacional de Energía Atómica, se compone de tres partes fundamentales: el cabezal de medición constituido por las cámaras de ionización y la fuente radioactiva; el equipo electrónico y panel de control y la estructura mecánica.

2 - CABEZAL DE MEDICION

Como se ve en la fig. 2 se compone de la fuente radioactiva y que irradia hacia ambos lados y dos cámaras de ionización; una Cs para la muestra standard y otra Ci para controlar el producto que se fabrica.

El aspecto exterior del cabezal puede apreciarse en las fotografías 3 y 4.

La fuente radioactiva está constituida por 7 mC de C^{14} bajo el compuesto de CO_3Ba con una actividad específica de 10 mC por milimol.

El carbonato activo en polvo está depositado en dos orificios de 11mm de diámetro por 0,1 mm de profundidad, uno en cada cara de un disco de celuloide de 0,5 mm de espesor. Está mantenido en esas cavidades por una delgada membrana de mylard (plástico metalizado) que cubre la superficie de los agujeros ahora llenos de C^{14} y va pegada con cemento al resto del disco.

Este disco de celuloide a su vez, va sujeto y prensado por dos piezas circulares simétricas de acero inoxidable (a modo de bridas), atornilladas entre si y ambas con un agujero central coincidente en dimensiones y posición con el del C^{14} , a efectos de permitir la irradiación.

Dos arandelas, una en cada cara del anillo de acero, sostienen sendas mallas de bronce que sirven para proteger la fuente contra posibles acciones mecánicas del exterior que pudieran destruir la membrana.

La fig. 5 ilustra la disposición de los distintos elementos que componen la fuente radioactiva.

La estructura resultante de acero inoxidable que contiene el material radioactivo, va fija en el interior de un buje de bronce cuya superficie exterior está roscada.

El conjunto se aloja en una tuerca de lucite lo cual permite la movilidad de la fuente radioactiva en el cabezal para corregir pequeñas diferencias respecto al cero del equipo, al variar su distancia respecto a las cámaras de ionización.

Estas últimas tienen forma cilíndrica y son abiertas del tipo denominado "de placas" para detectar partículas beta. Una de las placas o electrodo es la misma membrana de polietileno que permite el acceso de las partículas beta al interior de la cámara y que a tal efecto ha sido metalizada en su superficie interna para hacerla conductora de la corriente.

El otro electrodo es el de la señal, que recibe la corriente de ionización, enviándola al equipo amplificador. Lo forma una placa de lucite también metalizada. El conjunto de la cámara está esquematizado en la fig. 6.

El tubo de lucite que constituye el cuerpo exterior de la cámara está metalizado en su superficie interna, la que es llevada a la misma tensión que la membrana. Esto actúa como blindaje protector contra posibles perturbaciones desde el exterior que podrían alterar las débiles corrientes de la señal.

Para garantizar el buen funcionamiento de la cámara se usaron conectores del tipo amphenol con teflón y anillo de guardia en torno a la placa

de la señal, con lo cual las fugas de corriente a través de los aisladores son prácticamente nulas.

El metalizado de las distintas partes de la cámara se hizo por vaporización de aluminio en alto vacío, de la misma forma en que se opera con los espejos ópticos.

3 - DETERMINACION DE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE "i" PARA UNA DESINTEGRACION POR SEGUNDO DE C^{14}

Se usó la fuente plana de C^{14} de 7 mC de actividad total que emite hacia ambos lados, constituida por el disco de celuloide descrito anteriormente.

A los efectos del cálculo se supuso que la autoabsorción de la fuente y atenuación provocada por la membrana de sujeción, reducen la actividad útil a 4 mC.

La fuente se colocó en el interior de la cámara y se hicieron ensayos con geometría 4π y 2π , variando la tensión aplicada desde cero a 1.000 volts, en ambos casos.

Las curvas (a) y (b) de la fig. 7 muestran los resultados, estando tabulados sus valores en la Tabla N° 1.

Para calcular "i" debemos tomar el valor de saturación para la corriente I, ya sea en la geometría 4π ó 2π y dividirlo por el número total de desintegraciones que correspondan a cada caso.

Aceptaremos que los valores de I obtenidos para 1000 volts son con bastante aproximación las máximas corrientes de ionización para ambas geometrías. Se puede observar además que existe proporcionalidad entre la intensidad de corriente y el número de desintegraciones ya que para 4π el valor es el doble que para 2π .

En consecuencia:

$$i = \frac{1,3 \times 10^{-9}}{4 \times 3,7 \times 10^7} \text{ Amp seg}$$

$$i = 9 \times 10^{-18} \text{ Amp seg}$$

4 - TENSION DE SATURACION PARA LAS CONDICIONES DE TRABAJO

Reproduciendo las condiciones reales en que el equipo habrá de operar en la fábrica, se comprueba que la corriente oscila entre 10^{-12} y 10^{-13} Amp.

Para estos límites de intensidad de corriente se obtuvieron las curvas (a) y (b) de la fig. 8 que corresponden respectivamente a cada una de las cámaras usadas en el equipo de medición de espesores. Los valores experimentales figuran en la Tabla N° 2.

Se observa que para ambas cámaras, la tensión de saturación o de trabajo es aproximadamente de 120 volts.

$$T_s = 120 \text{ volts}$$

5 - EQUIPO ELECTRONICO Y PANEL DE CONTROL

El sistema electrónico del equipo para medición de espesores, consta de:

- Las cámaras de ionización;
- El amplificador de corriente;
- El panel de control.

Cámaras de ionización:

Como se indica en el esquema de la fig. 2 se emplean dos cámaras de ionización para detectar la señal, que se conectan en oposición de tal manera que las corrientes generadas en cada una de ellas tienen sentidos opuestos.

La tensión de polarización de las cámaras se obtiene de la fuente general del equipo. La estabilidad es del orden del uno por ciento para variaciones de línea de 25% habiéndose incluido un filtro de salida de constante de tiempo grande para amortiguar los saltos de tensión en la red de alimentación.

Amplificador de corriente:

La diferencia que pudiera resultar entre las corrientes generadas por las cámaras de ionización se aplica a un amplificador electrométrico.⁽¹⁾

(1) KOPP, M.- PINASCO, S. Micro-microamperímetro. Informe N° 3 - Comisión Nacional de Energía Atómica - Argentina. 1958, 8.

El amplificador usa en la entrada una válvula electrométrica tipo CK5886 seguida por una etapa amplificadora con una válvula 6AW8 cuya salida se conecta a un seguidor catódico. Fig 9.

La tensión de cátodo se realimenta a través de un divisor y una resistencia de 10^{12} ohms a la entrada. La primera etapa tiene una ganancia:

$$G_1 \approx 110$$

y la segunda:

$$G_2 \approx 60$$

Teniendo en cuenta que en el divisor de rejilla del seguidor catódico la ganancia se reduce en un factor "2", la amplificación total entre la entrada y la salida es:

$$K = \frac{G_1 \times G_2}{2} \approx 3.300$$

La corriente de entrada se había estimado mediante ensayos previos experimentales en

$$i = 10^{-12} \text{ Amp}$$

y en la salida se necesitaba una tensión $e_o = -10$ volts para esta corriente; sabiendo que:

$$e_o/i = -R/\beta$$

donde R es la resistencia de realimentación y β la transferencia del divisor de salida, resulta:

$$\beta = \frac{-R \cdot i}{e_o} = \frac{-10^{12} \cdot 10^{-12}}{-10} = \frac{1}{10}$$

De las resistencias del divisor y de realimentación, depende la estabilidad y exactitud de la medición por lo cual se han colocado resistencias de óptima calidad.

El ajuste de cero se efectúa desde el panel de control, cortocircuitando la resistencia de realimentación y variando la tensión de pantalla de la válvula electrométrica.

La constante de tiempo de respuesta del amplificador está dada por:

$$\tau = \frac{R}{K \cdot \beta + 1} [C + C_d (K \cdot \beta + 1)] \quad \text{donde:}$$

R = resistencia de realimentación
 K = ganancia total
 β = transferencia del divisor de salida
 C_d = capacidad de entrada a salida
 C = capacidad de entrada

$$\text{Considerando que } K \cdot \beta \cong 3.300 \cdot \frac{1}{10} \cong 330 \quad (1)$$

y que además:

$$C \cong 50 \text{ pF}$$

$$C_d = 20 \text{ pF}$$

$$R = 10^{12} \text{ ohms}$$

$$K \cdot \beta \cong 330$$

resulta finalmente:

$$\tau \cong \frac{10^{12}}{330} (50 + 6.600) \cdot 10^{-12} \cong 20 \text{ seg}$$

Panel de control:

La tensión de salida del amplificador se lleva al panel de control donde es contrastada con una tensión muy estabilizada cuyo valor puede fijarse en el rango ± 10 volts alrededor del punto normal de trabajo.

Esto se ha hecho con el fin de compensar pequeñas variaciones de corriente en las cámaras de ionización motivadas por alteraciones en la geometría o por pequeñas diferencias de densidad entre la muestra "standard" y el material a medir.

El contraste entre la tensión de salida del amplificador y la tensión estabilizada mencionada anteriormente, se efectúa mediante un registrador gráfico de 100 micro-amperes a plena escala cuya sensibilidad es variable para calibrar el rango de medición.

En paralelo con el circuito de medición se han conectado dos dispositivos de disparo que actúan sobre un sistema indicador cuando el material a medir sobrepasa las tolerancias prefijadas.

Este sistema indicador consta de tres señales luminosas y una chicharra. Cuando el material está dentro de la tolerancia permanece encendida la señal que indica "normal" mientras que si se sobrepasa dicho límite se enciende la señal (+) ó (-) evidenciando un material más o menos denso que la muestra standard. Junto con esas dos señales visuales acciona la chicharra para evitar en toda forma que la alteración en el proceso de fabricación pase inadvertida.

Las mediciones realizadas con el equipo han demostrado la excelente estabilidad del cero, ya que la desviación resultó menor que el 2% de plena escala en registros durante más de tres días.

Para un material de aproximadamente 70 gr/m^2 esta desviación equivale tan sólo a un 0,2% en el espesor del mismo, habiéndose comprobado también que el ruido estadístico se mantiene menor que un 0,5% de variación de espesor.

6 - ESTRUCTURA MECANICA

La disposición en forma de herradura, mostrada en las fotografías 3 y 4, se adoptó en orden a dos finalidades:

a) mantener completamente rígidos los distintos elementos del cabezal de medición;

b) permitir el desplazamiento de este último a lo largo de una trayectoria que cubra la mayor parte posible del ancho de la hoja sometida a la calibración, para controlar distintas zonas de la lámina con el mismo equipo.

La carrocería está construida en chapa de aleación de aluminio de espesor tal que constituye a la vez la estructura resistente de manera que el conjunto resulta simple y liviano.

El equipo se desliza sobre dos rieles y el presente modelo es accionado en forma manual mediante una manija inserta en la parte posterior, que lleva acoplado un dispositivo de freno para fijar el aparato en una posición determinada.

7 - ERROR DE LAS MEDICIONES

Vamos a considerar sólo dos tipos de error; el error estadístico que depende del número de desintegraciones por unidad de tiempo y el intervalo de respuesta y el error de apreciación en el instrumento de lectura.

Para acotar estos errores es necesario conocer la naturaleza de la función que liga las intensidades de corriente con los gramos por metro cuadrado de material absorbente.

A tal efecto se determinó experimentalmente y en las condiciones de trabajo la ley que vincula ambas variables, obteniéndose la curva de la fig. 1 cuyo cuadro de valores figura en la Tabla N° 3.

Trasladando estos valores a un papel semilogarítmico, de manera que en el eje de las ordenadas se expresen los logaritmos de las intensidades de corriente, fig. 10, puede observarse que en casi toda su longitud y a partir de 30 gramos por metro cuadrado, la curva resultante se adapta muy aproximadamente a una recta.

Este hecho significa que una función exponencial del tipo:

$$I = I_0 \cdot e^{-a \cdot x}$$

podría usarse en lugar de la verdadera ley, con suficiente exactitud para los fines prácticos.

Se halló que los valores

$$I_0 = 5,7 \cdot 10^{-11} \text{ Amp y}$$

$$a = 0,044 \text{ m}^2/\text{gr}$$

es decir la función $I = 5,7 \cdot e^{-0,044 \cdot x}$

son adecuados para los cálculos subsiguientes del error.

Se puede considerar el valor de

$$a = 0,044 \text{ m}^2/\text{gr}$$

como el coeficiente de atenuación aparente para el espectro continuo de energías de la radiación beta emitida por el C^{14} .

Con todos estos datos podemos ahora calcular el error estadístico de las mediciones, mediante el uso de la fórmula: ⁽¹⁾

$$\left(\frac{\Delta x}{x} \right)_{\text{est.}} : 100 = \sqrt{\frac{2i \cdot I}{T} \cdot \frac{1}{I'} \cdot \frac{1}{x} \cdot 100} \quad (2)$$

donde:

$$i = 9 \cdot 10^{-18} \text{ Amp seg}$$

$$I = 5,7 \cdot e^{-0,044 \cdot x} \cdot 10^{-11} \text{ Amp}$$

$$I' = 0,0251 \cdot e^{-0,044 \cdot x} \cdot 10^{-11} \text{ Amp m}^2/\text{gr}$$

$$x = \text{gr/m}^2 \text{ de material absorbente}$$

$$T = \text{constante de tiempo (20 seg)}$$

Mediante las fórmulas (1) y (2) calculamos los valores de la Tabla 4.

Los valores de la última columna dan los errores estadísticos porcentuales correspondientes a cada medición. Como vemos resultan prácticamente despreciables y ello se debe a la constante de tiempo comparativamente grande (20 seg) adoptada para el equipo.

Las pruebas experimentales nos permiten aceptar como error de apreciación en la lectura, al correspondiente a 1/4 de división del instrumento en el rango de

$$10 \times 10^{-12}$$

es decir la cantidad de $\frac{10^{-11}}{200}$ Amp ya que hay cincuenta divisiones en la escala.

Los errores de apreciación porcentuales serán:

$$\begin{aligned} e_a \% &= \left(\frac{\Delta x}{x} \right)_{\text{ap.}} \cdot 100 = \frac{10^{-11}}{200 \cdot x \cdot I'} \cdot 100 \\ e_a \% &= \frac{10^{-11}}{2x \cdot I'} \end{aligned} \quad (3)$$

Con la ayuda de la fórmula (3) construimos la Tabla N° 5.

(1) OWAKI, K.- OSHIDA, T.- MIWE, H.: Peaceful uses of Atomic Energy United Nations. Tomo 19, 162 (1958).

El error total de las mediciones será la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de todos los errores. Hemos visto ya que el error estadístico resulta despreciable de modo que solamente tendremos en cuenta los errores de apreciación que figuran en la última columna de la tabla anterior.

Dado que el equipo opera con dos cámaras de ionización, indicando la diferencia de lecturas entre el papel que se mide y la muestra standard, resultará que el error total de lectura " e_t " será raíz de dos multiplicada por el error de apreciación correspondiente al valor de la muestra standard.

En efecto:

$$e_t = \sqrt{e_a^2 + e_a^2} = \sqrt{2 \cdot e_a} \quad (4)$$

Con la (4) podemos finalmente tabular los errores totales relativos que figuran en la Tabla N° 6.

Con estos valores construimos el gráfico de la fig. 11.

Los resultados obtenidos muestran que, según las exigencias industriales de cada caso en cuanto a precisión, el mismo equipo podría emplearse para un cierto margen de calidad del producto que se fabrica.

Así si las tolerancias impuestas fueran del 5% de error máximo respecto al valor aceptado como standard, el equipo podría usarse para calibración de papeles hasta de 120 gr/m² con sólo cambiar la muestra standard en el cabezal de medición.

Para mayores espesores o pesos por unidad de área si se quiere obtener una precisión razonable, habrá que cambiar necesariamente el material de la fuente radiactiva.

Por ejemplo, manteniendo constante el intervalo de respuesta de 20seg. es dable esperar una gran precisión para materiales de 60 gramos hasta 5.000 gramos por metro cuadrado usando Estroncio 90. También el Talio 204 y el Promethium 147 son radioisótopos adecuados para densidades donde el C¹⁴ se descarta por su baja energía.

Estos distintos radioisótopos podrían utilizarse en el mismo equipo descripto, con sólo adoptar las precauciones de diseño en el porta fuente del cabezal, necesarias para evitar la irradiación al exterior.

El equipo al que se refiere el presente informe fue ensayado muy satisfactoriamente en una importante fábrica de papel, en una máquina donde la hoja en fabricación se producía a razón de 150 metros por minuto. Se hicieron mediciones en papeles de 55 y 80 gramos por metro cuadrado obteniéndose registros gráficos del gramaje del papel en distintas zonas del ancho de la hoja abarcada por la garganta de la estructura mecánica. Estos registros cuya exactitud fue comprobada contrastándolos con pesajes de precisión permitieron en varias oportunidades la corrección de defectos de gramaje derivados del incorrecto funcionamiento de la continua.

TABLA N° 1

ENSAYOS CON GEOMETRIA 4 π y 2 π

TENSION	GEOMETRIA 4 π I	GEOMETRIA 2 π I
Volts	Amp	Amp
20	10^{-10}	$0,4 \cdot 10^{-10}$
40	$2,6 \cdot 10^{-10}$	$0,8 \cdot 10^{-10}$
60	$4 \cdot 10^{-10}$	$1,2 \cdot 10^{-10}$
80	$5 \cdot 10^{-10}$	$1,4 \cdot 10^{-10}$
100	$6 \cdot 10^{-10}$	$1,7 \cdot 10^{-10}$
140	$7,20 \cdot 10^{-10}$	$2,2 \cdot 10^{-10}$
200	$8,7 \cdot 10^{-10}$	$2,9 \cdot 10^{-10}$
240	10^{-9}	$3,2 \cdot 10^{-10}$
280	10^{-9}	$3,5 \cdot 10^{-10}$
300	$1,1 \cdot 10^{-9}$	$3,7 \cdot 10^{-10}$
400	$1,1 \cdot 10^{-9}$	$4,3 \cdot 10^{-10}$
800	$1,2 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{-10}$
1.000	$1,3 \cdot 10^{-9}$	$6,6 \cdot 10^{-10}$

TABLA N° 2

TENSION DE SATURACION DE LAS CAMARAS

TENSION (volts)	CAMARA SUP. C _s (standard) I Amp	CAMARA INF. C _i (medición) I Amp
20	$8,20 \times 10^{-13}$	$5,00 \times 10^{-13}$
40	$1,40 \times 10^{-12}$	$1,20 \times 10^{-12}$
60	$1,50 \times 10^{-12}$	$1,40 \times 10^{-12}$
80	$1,60 \times 10^{-12}$	$1,50 \times 10^{-12}$
100	$1,60 \times 10^{-12}$	$1,55 \times 10^{-12}$
120	$1,65 \times 10^{-12}$	$1,55 \times 10^{-12}$
140	$1,65 \times 10^{-12}$	$1,55 \times 10^{-12}$
500	$1,70 \times 10^{-12}$	$1,60 \times 10^{-12}$

TABLA N° 3

VALORES DE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE EN FUNCIÓN
DEL PESO POR UNIDAD DE ÁREA

Tensión 120 Volts

gr/m^2	Intensidad (Amp)
0	$3,4 \times 10^{-11}$
17,11	$2,1 \times 10^{-11}$
34,71	$1,2 \times 10^{-11}$
53,03	$0,56 \times 10^{-11}$
71,31	$0,27 \times 10^{-11}$
88,38	$0,12 \times 10^{-11}$
105,43	$0,054 \times 10^{-11}$
122,90	$0,027 \times 10^{-11}$
140,53	$0,015 \times 10^{-11}$

TABLA N° 4

ERRORES ESTADISTICOS

x	I	I'	$\sqrt{\frac{21 \cdot I}{T}}$	I' . x	$\left(\frac{\Delta x}{x}\right)_{\text{est.}} \cdot 100$
gr/cm ²	(Amp. 10 ⁻¹¹)	$\frac{(\text{Amp. cm}^2 \cdot 10^{-11})}{\text{gr}}$	(Amp. 10 ⁻¹⁵)	(Amp. 10 ⁻¹⁵)	
30	1,52	0,067	3,7	20.100	0,0184
40	0,98	0,043	2,97	17,200	0,0173
50	0,632	0,0278	2,39	13.900	0,0172
60	0,407	0,0179	1,91	11.460	0,0166
70	0,262	0,0115	1,53	8.050	0,0191
80	0,168	0,00743	1,23	5.944	0,0207
90	0,109	0,00478	0,99	4.302	0,0230
100	0,07	0,00308	0,79	3.080	0,0257
120	0,0284	0,00125	0,51	1.500	0,0340
140	0,0116	0,00051	0,32	714	0,045

TABLA N° 5

ERRORES DE APRECIACION

x gr/m^2	$x \cdot I'$ $\text{Amp.} \cdot 10^{-11}$	$\epsilon_a \% = \frac{10^{-11}}{2 x \cdot I'}$
30	2,01	0,25
40	1,72	0,29
50	1,39	0,36
60	1,15	0,44
70	0,805	0,62
80	0,594	0,84
90	0,430	1,16
100	0,308	1,63
120	0,150	3,33
140	0,071	7,05

TABLA N° 6

ERRORES TOTALES

x	e _t
gr/m ²	‰
30	0,35
40	0,4
50	0,5
60	0,63
70	0,9
80	1,2
90	1,7
100	2,3
120	4,7
140	9,9

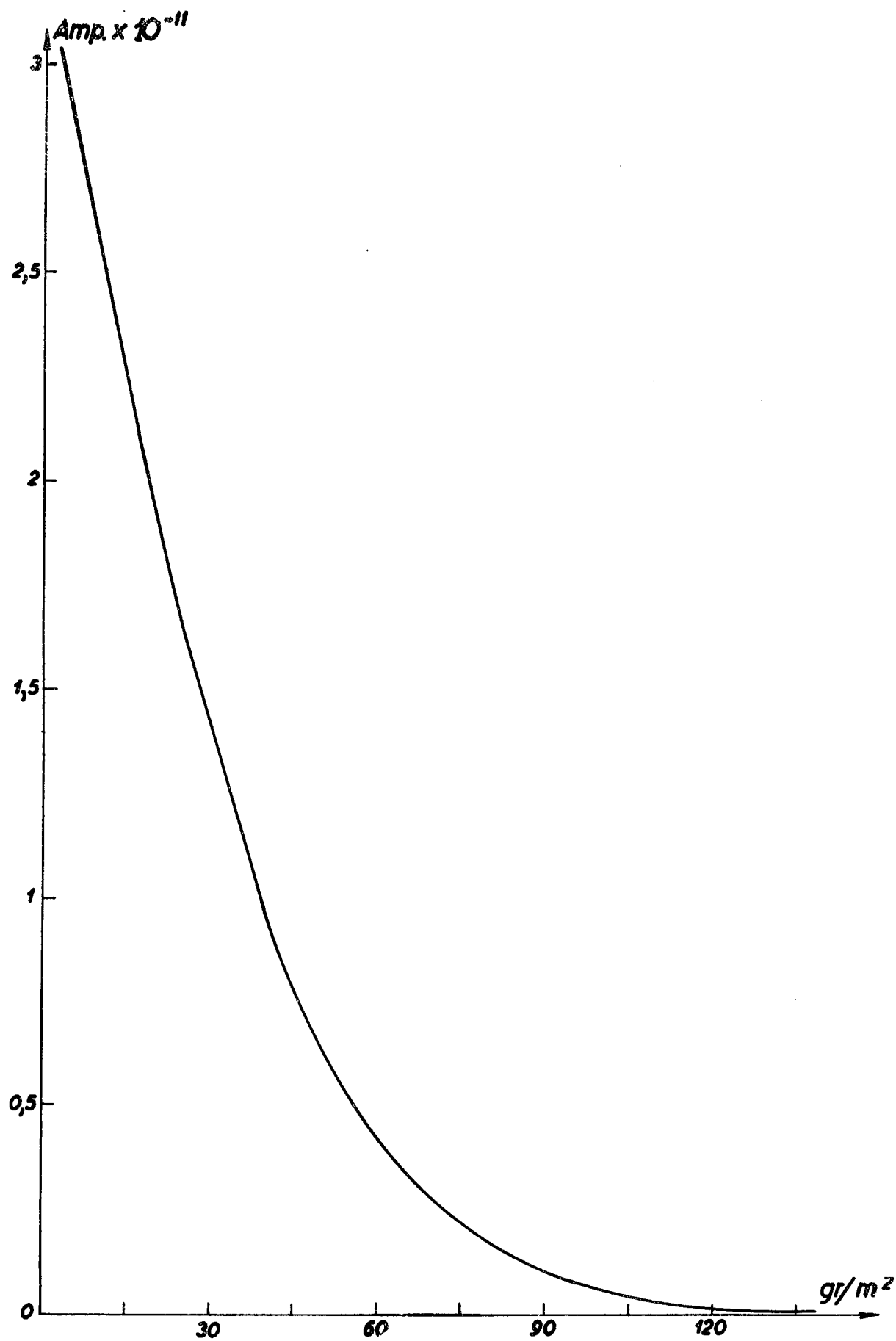
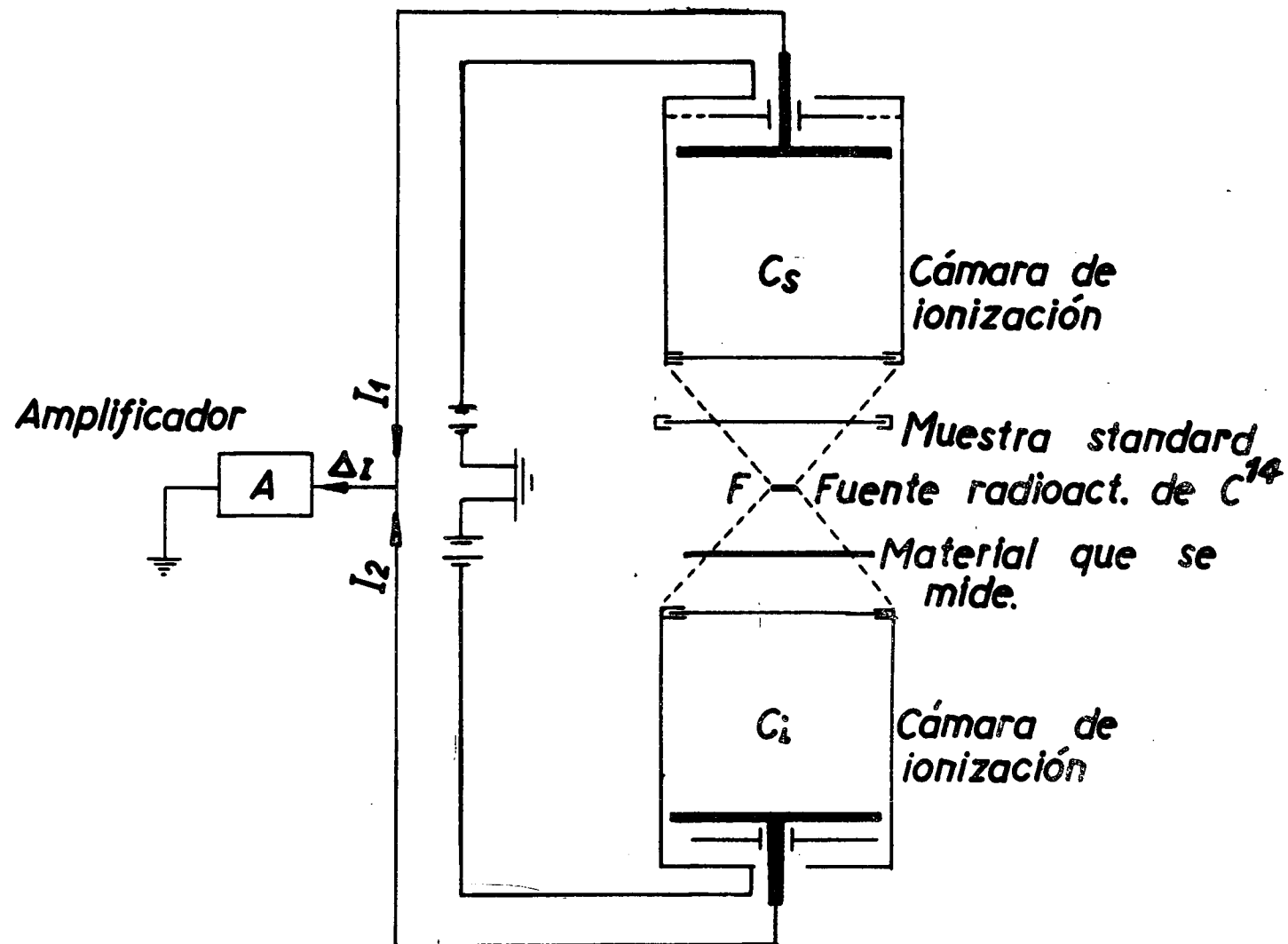
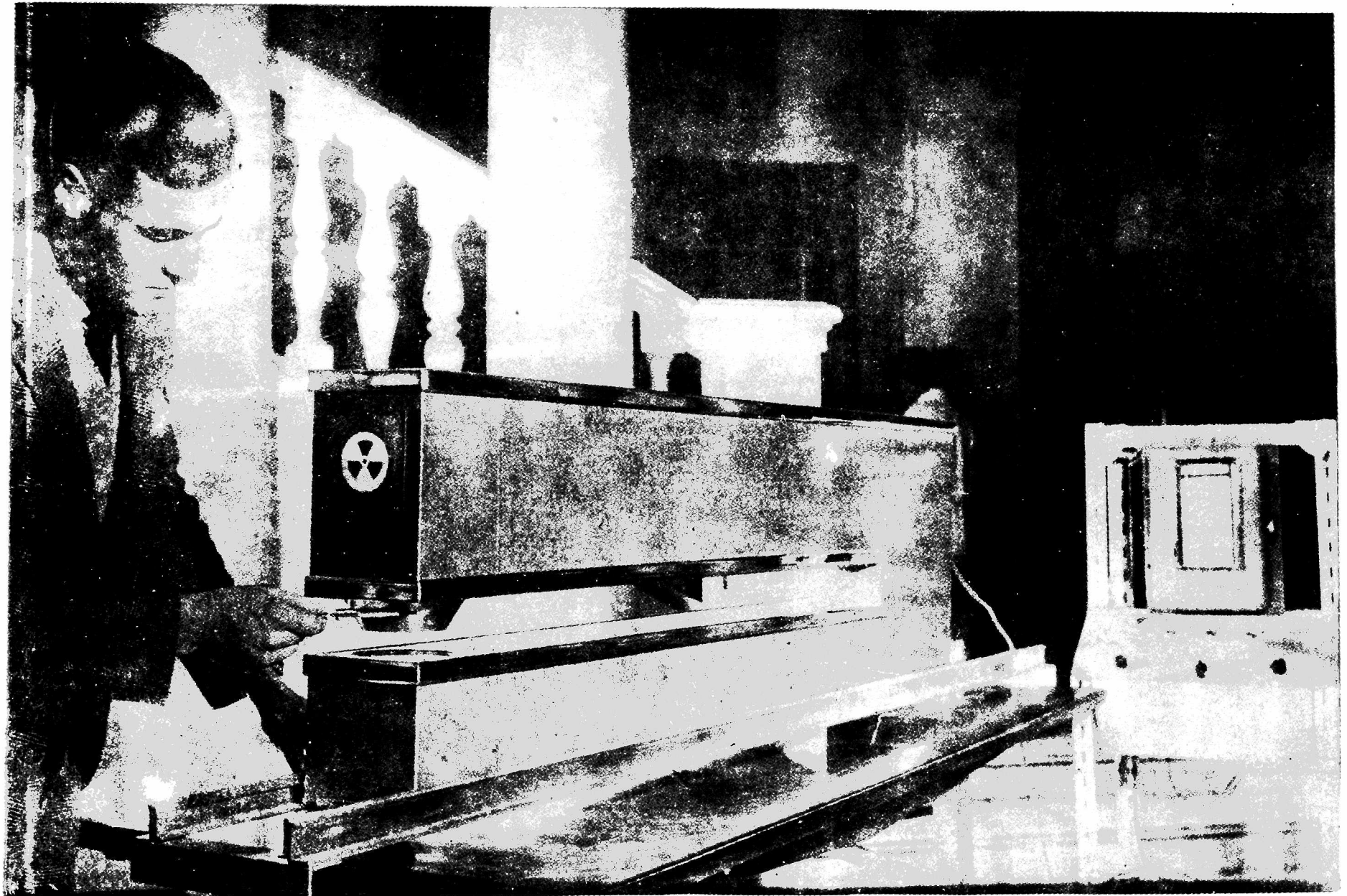


Figura 1

Figura 2





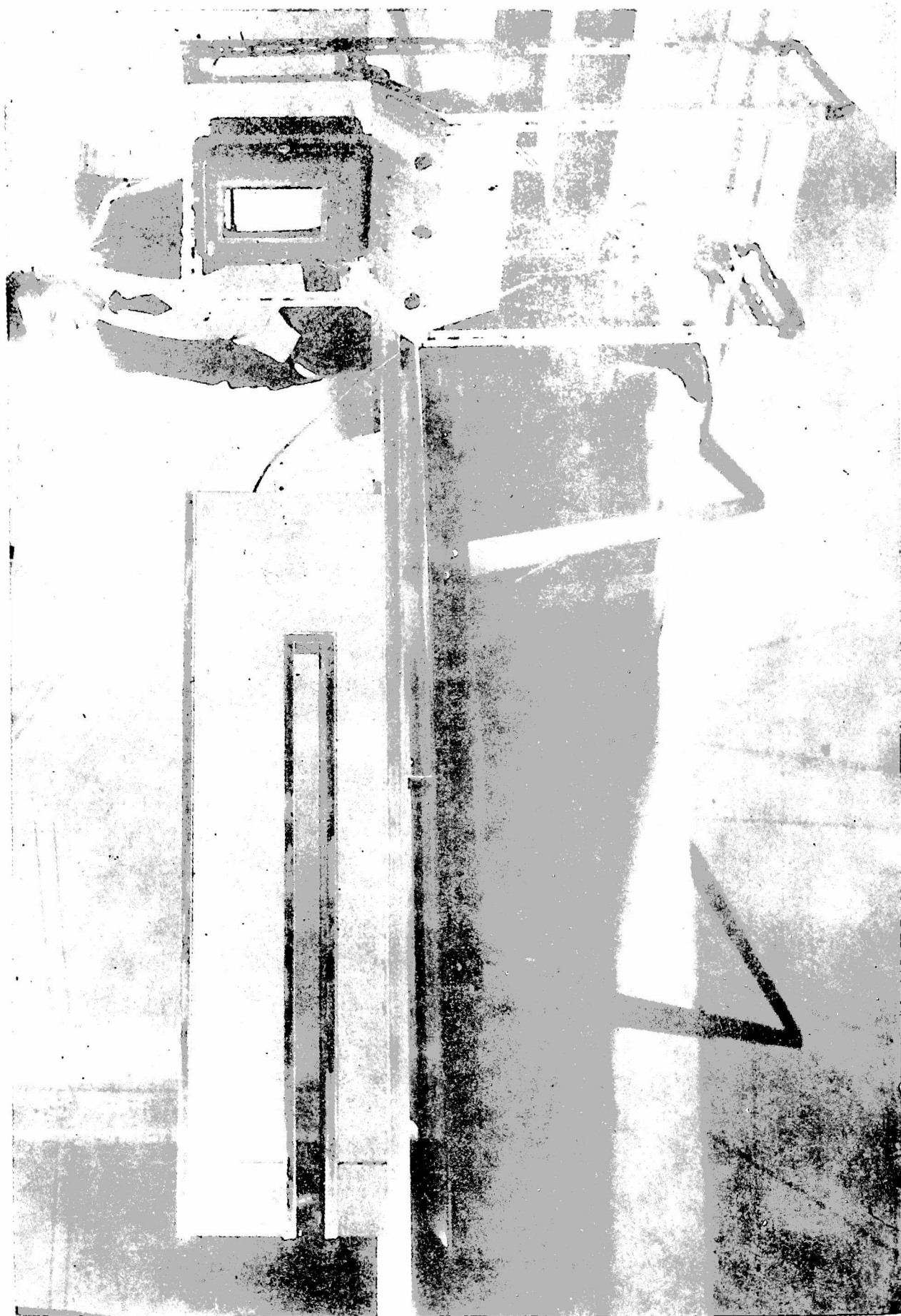
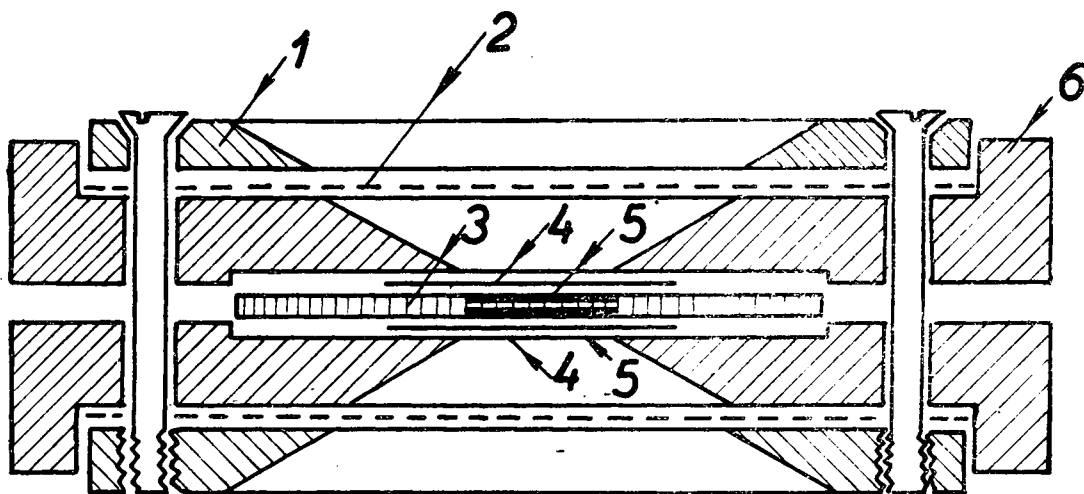


Figure 4



Referencias

- 1) Arandela de acero inoxidable.
- 2) Malla de bronce.
- 3) Disco de celuloide.
- 4) Membrana de millard.
- 5) Carbono 14 en polvo. (CO_3Ba)
- 6) Anillo de acero inoxidable.

ESC. 0 4cm

Figura 5

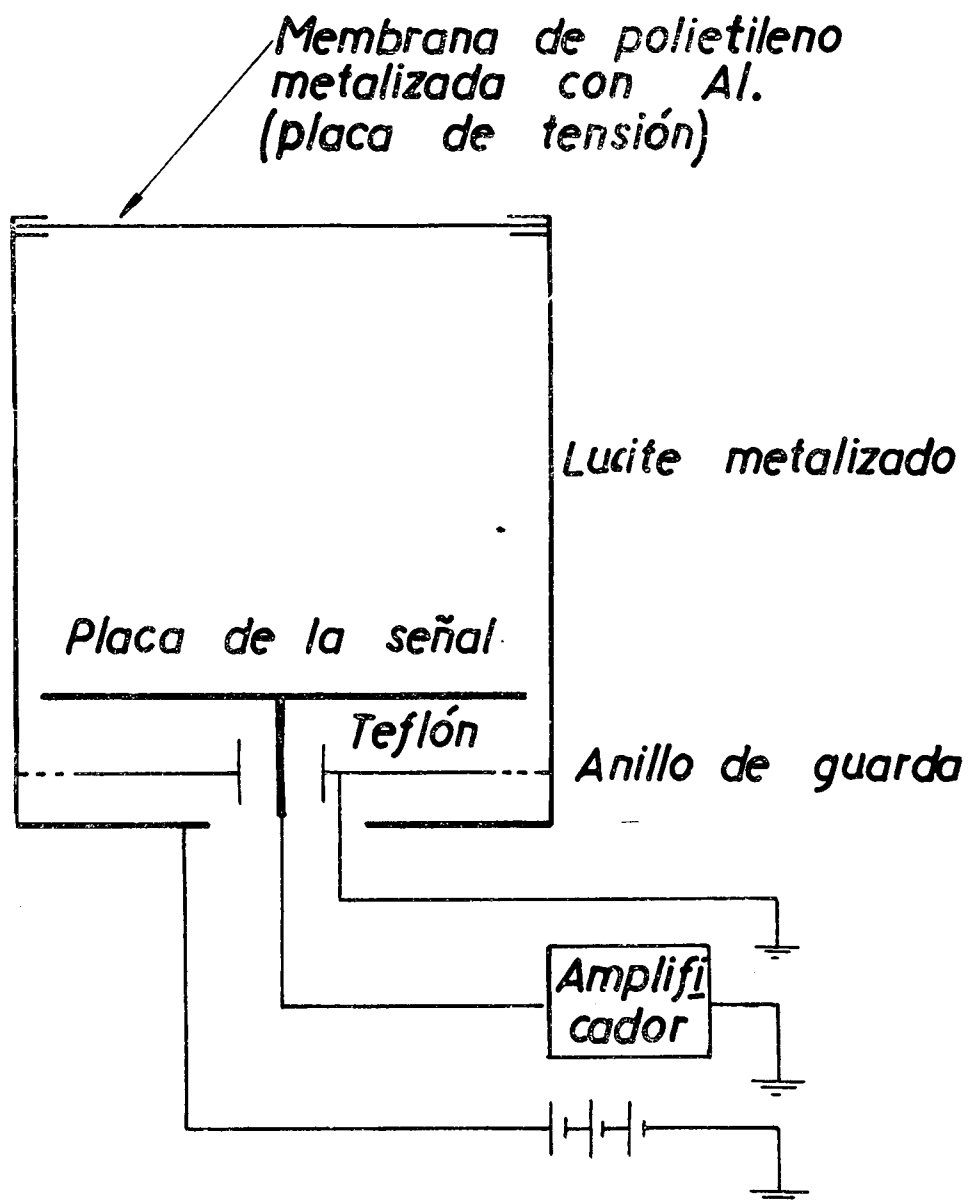
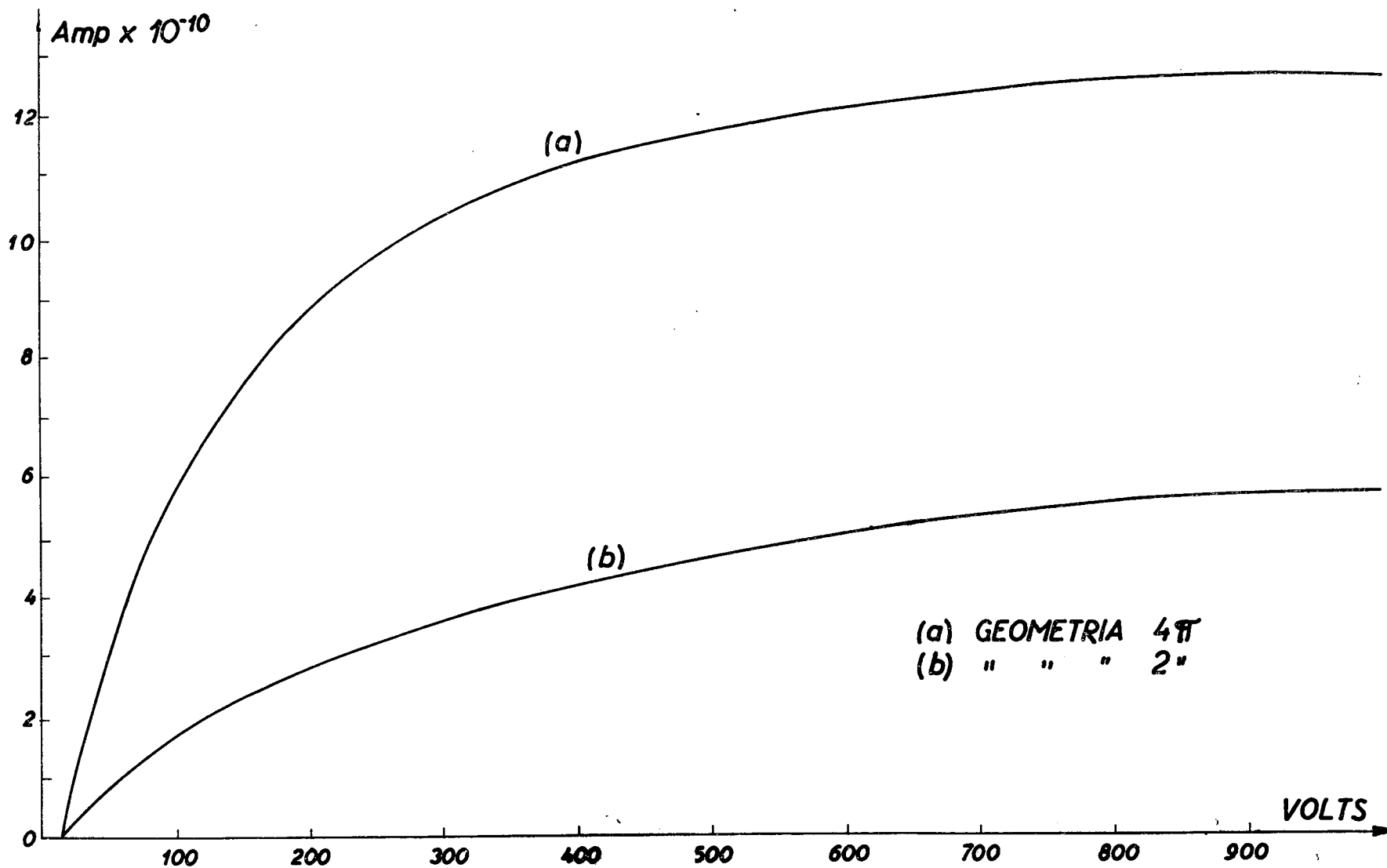
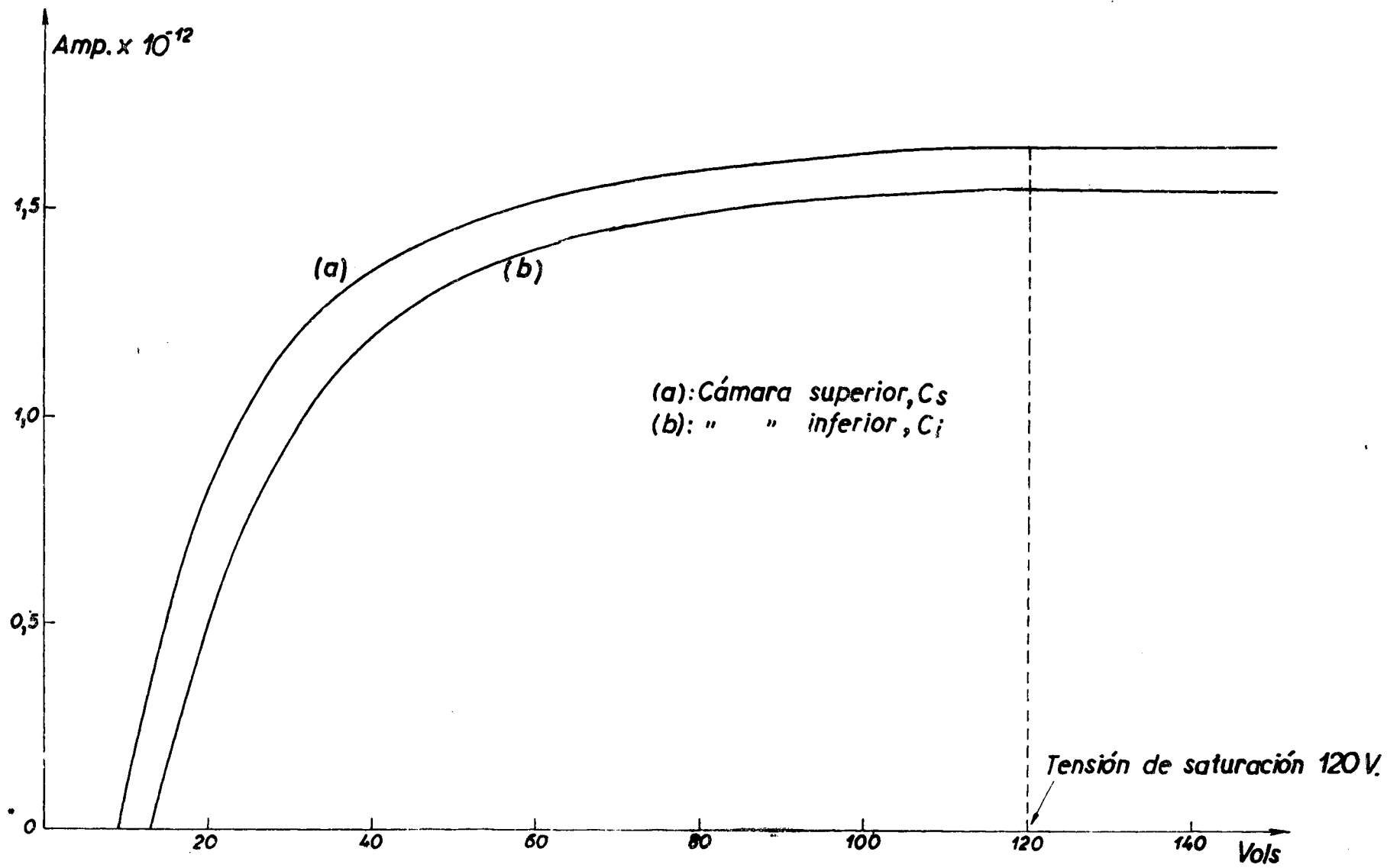


Figura 2

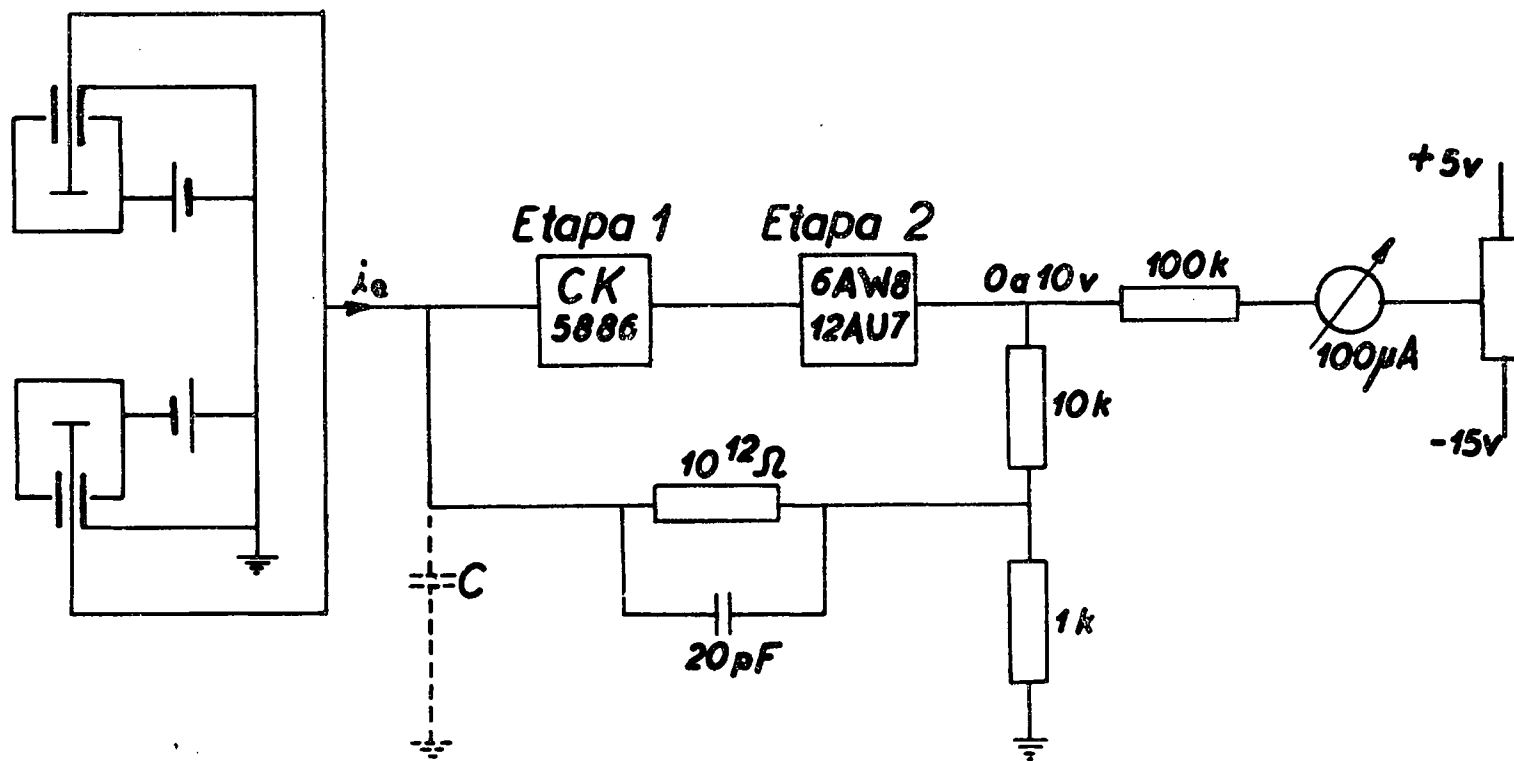
Figure 7





o

Figure 9



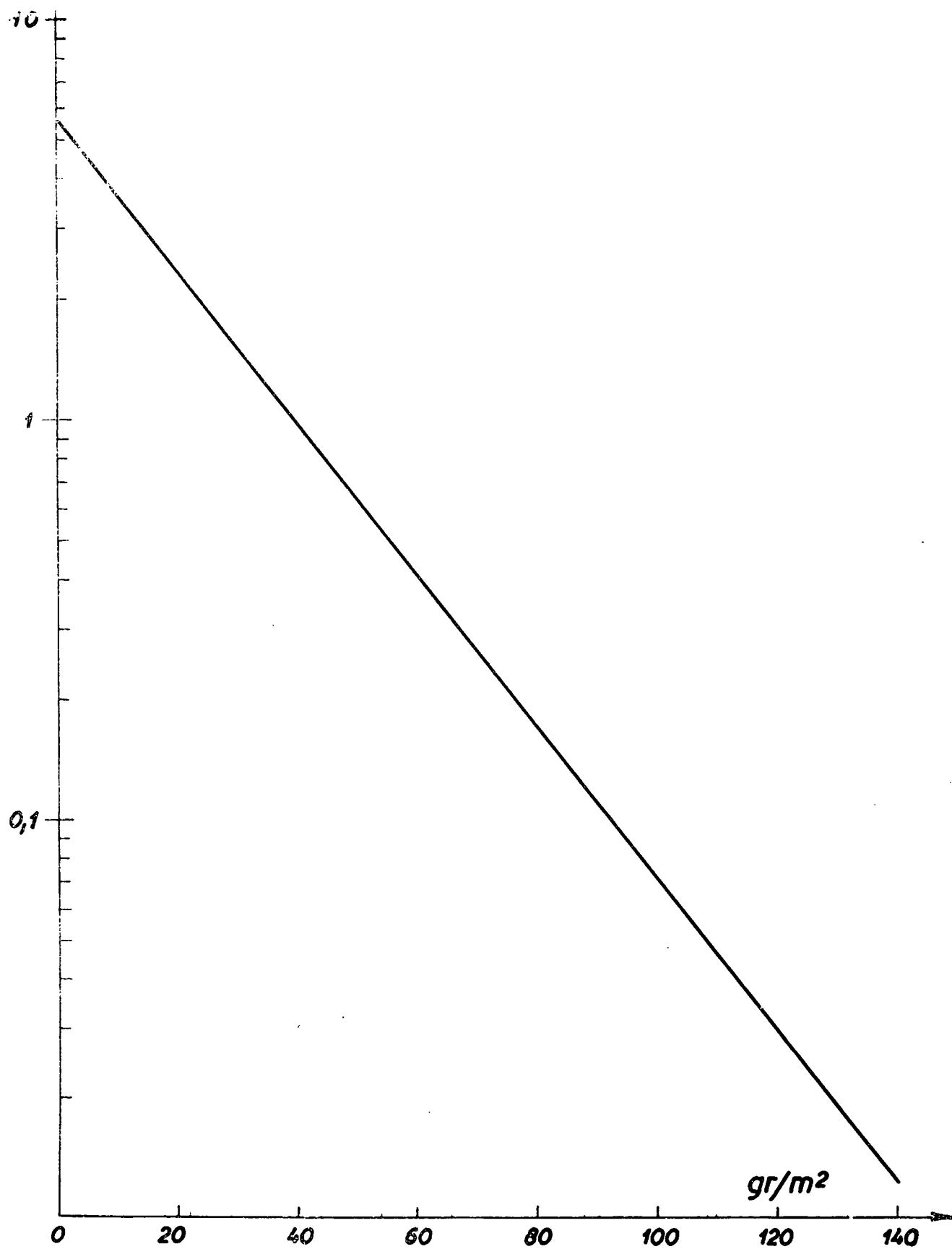


Figure 10

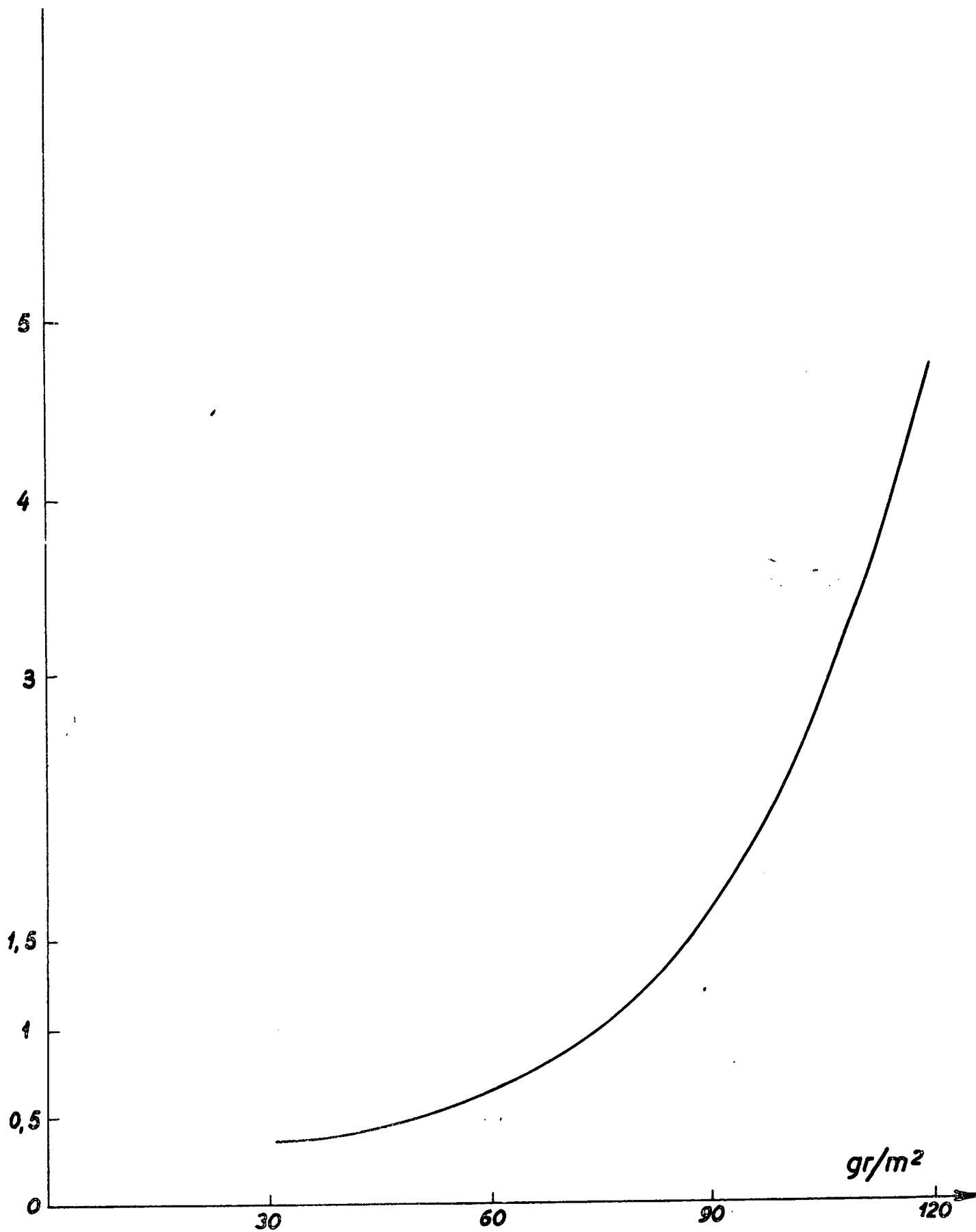


Figura 11