

REPUBLICA ARGENTINA

PUBLICACIONES
DE LA
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

INFORME N° 3
(TEORIA DE CIRCUITOS - INSTRUMENTAL DE MEDICION)

MICRO-MICROAMPERIMETRO

POR
MANFREDO C. KOPP Y SANTIAGO F. PINASCO

★

BUENOS AIRES
1958

MICRO-MICROAMPERIMETRO *

POR

MANFREDO C. KOPP Y SANTIAGO F. PINASCO

★

SUMMARY

A micro-microammeter with excellent accuracy, zero stability, and speed of response has been developed for the measurement of small ion currents. Performance data, circuits and theory are presented in detail.

INTRODUCCION

El micro-microamperímetro construído es un electrómetro a válvula de alta sensibilidad con excelente exactitud, estabilidad de cero y velocidad de respuesta. Entre sus muchos usos se incluyen medidas de pequeñas corrientes iónicas en el control de reactores y sistema de monitorajes; determinación de radioactividad en muestras biológicas marcadas, y medidas de corrientes iónicas en espectrometría de masas. Cuando es usado con una fuente suficientemente estable, preferentemente baterías, el instrumento es útil para medir resistencias elevadas y pérdidas en capacitores y aislantes.

CARACTERISTICAS

El micro-microamperímetro que se presenta aquí, tiene veinte rangos, cubriendo 10 décadas que van de los 10^{-3} a 10^{-13} amperes. La corriente puede ser leída en dos rangos por década, desde 10^{-3} a

* Trabajo presentado para su publicación en julio de 1958.

3×10^{-13} amperes. La exactitud está dentro del 2 % del fondo de escala en los rangos de 10^{-3} a 10^{-7} y dentro del 4 % en los rangos restantes.

El corrimiento de cero luego de 60 minutos de calentamiento es mejor que el 1 % para 24 horas hasta el rango de 3×10^{-12} amperes, mejor que el 2 % en el rango de 10×10^{-13} y mejor que el 3 % en el rango de 3×10^{-13} .

Otra característica importante de este equipo, es su rápida respuesta a transitorios. La constante de tiempo depende de los rangos: un valor típico de la constante de tiempo es 2 segundos en el rango de 10×10^{-12} amperes con una capacidad de entrada de 5.000 pF.

Dispone además de dos salidas: una para un instrumento de 1 mA. de consumo, y otra de 10 milivoltios. Haciendo uso de estas salidas y con un instrumento adecuado, las cifras dadas sobre exactitud se pueden mejorar en un factor dos.

DESCRIPCION DEL CIRCUITO

En la literatura existen ya equipos como éste, que se basan en el mismo principio de funcionamiento ⁽¹⁾, y en la C. N. E. A. en el equipo de control del Reactor RA1 se encuentran amplificadores de este tipo, cuyos circuitos fueron facilitados por el Departamento de Electrónica de los Laboratorios Nacionales de Argonne, Estados Unidos, pero en ninguno de los casos el rango de corriente pasa de 10^{-11} amperes. Sabiendo de la existencia de por lo menos un equipo comercial ⁽²⁾ con un rango de 3×10^{-13} es que se originó este instrumento. La solución se ha obtenido con un circuito sumamente sencillo y con el empleo de solamente cinco válvulas.

El circuito consiste en un amplificador de corriente continua con una ganancia de más o menos 5.000, al cual se le aplica realimentación negativa a través de una resistencia desde la salida a la reja

⁽¹⁾ "Linear Feedback Analysis" por J. G. Thomason, Pergamon Press Ltd., 1955, pp. 265-269.

⁽²⁾ "A new, high-sensitivity electrometer" por A. G. Fousquet, The General Radio Experimenter, Vol. 30, N° 10, March 1956, pp. 1-5.

de una válvula electrométrica que es la primera válvula del amplificador. En la Fig. 1, se muestra el esquema detallado del circuito.

La primera etapa del amplificador, es una válvula electrométrica operando como pentodo, que con la resistencia de 60 Mohms en placa posee una ganancia de 110; le sigue un triodo pentodo en conexión de acoplamiento por cátodo. Un doble triodo conectado en paralelo se usa como seguidor catódico en la etapa de salida.

La válvula electrométrica usada, en las condiciones de trabajo posee una corriente de reja menor que 3×10^{-15} amperes que representa un 1 % del fondo de escala del rango más sensible.

El ajuste de cero se efectúa variando la tensión de pantalla de la válvula electrométrica por medio del potenciómetro P1. Para aumentar la sensibilidad de este ajuste, se conecta por medio de la llave L_2 una resistencia de 5 Kohms en paralelo con la resistencia serie del instrumento.

La misma llave L_2 permite también cortocircuitar el instrumento a los fines de protección de éste.

La llave L_5 permite invertir el instrumento y así poder hacer mediciones de corrientes en ambas direcciones.

Los cambios de décadas se hacen por medio de la llave L_4 , y los cambios de rango por década, por medio de la llave L_3 . La falta de una llave de aislación suficientemente buena y un número de posiciones adecuado, nos obligó a emplear dos llaves para la operación de cambio de rangos.

Los rangos dependen de las resistencias R_1 a R_9 y del divisor compuesto por las resistencias R_{26} , R_{27} , R_{28} y R_{29} . Si llamamos R a las resistencias R_1 a R_9 y β a la transferencia del divisor, la relación entre la tensión de salida y la corriente de entrada es

$$\frac{e_o}{i} = \frac{R}{\beta}$$

Por razones de disponibilidad, el máximo valor de resistencia que se usó para R es 10^{12} ohms, habiéndose fijado además, la tensión de salida plena escala en 10V.; la máxima sensibilidad del instrumento de 3×10^{-13} amperes, se obtiene dándole a β un valor de 0,03.

Un factor importante en este tipo de circuito, por ser el que fija la exactitud, estabilidad de cero y velocidad de respuesta, es el factor de realimentación $K\beta$, donde K es la ganancia de corriente continua del amplificador que debe ser mucho mayor que 1.

En este equipo en el peor de los casos

$$K\beta \simeq 150$$

También es de suma importancia la calidad de las resistencias R y las del divisor β , pues para un $K\beta \gg 1$, la exactitud y estabilidad queda fijada por ellas.

APÉNDICE

Teniendo en cuenta la falta de bibliografía sobre este tema en la lengua castellana, se ha creído conveniente en este apéndice exponer en una forma breve la teoría de donde se deducen las principales propiedades de este circuito.

TRANSFERENCIA COMPLEJA Y CONSTANTE DE TIEMPO

Tomaremos como referencia el circuito de la Fig. 2. C representa la capacidad a la entrada, C_d la capacidad entre reja y atenuador β y $A(p)$ la transferencia compleja del amplificador. Si llamamos $E_o(p)$, $E_g(p)$ e $I(p)$ las transformadas de $e_o(t)$, $e_g(t)$ e $i(t)$, podemos escribir

$$E_o(p) = -A(p) E_g(p) \quad (1)$$

Despreciando la corriente de reja i_R en la entrada del amplificador, tendremos

$$I(p) = \frac{E_g(p) - \beta E_o(p)}{R} (1 + pRC_d) + E_g(p)pC \quad (2)$$

Introduciendo (1) en (2) y despejando $\frac{E_o(p)}{I(p)}$ que no es otra cosa que la transferencia compleja total, resulta

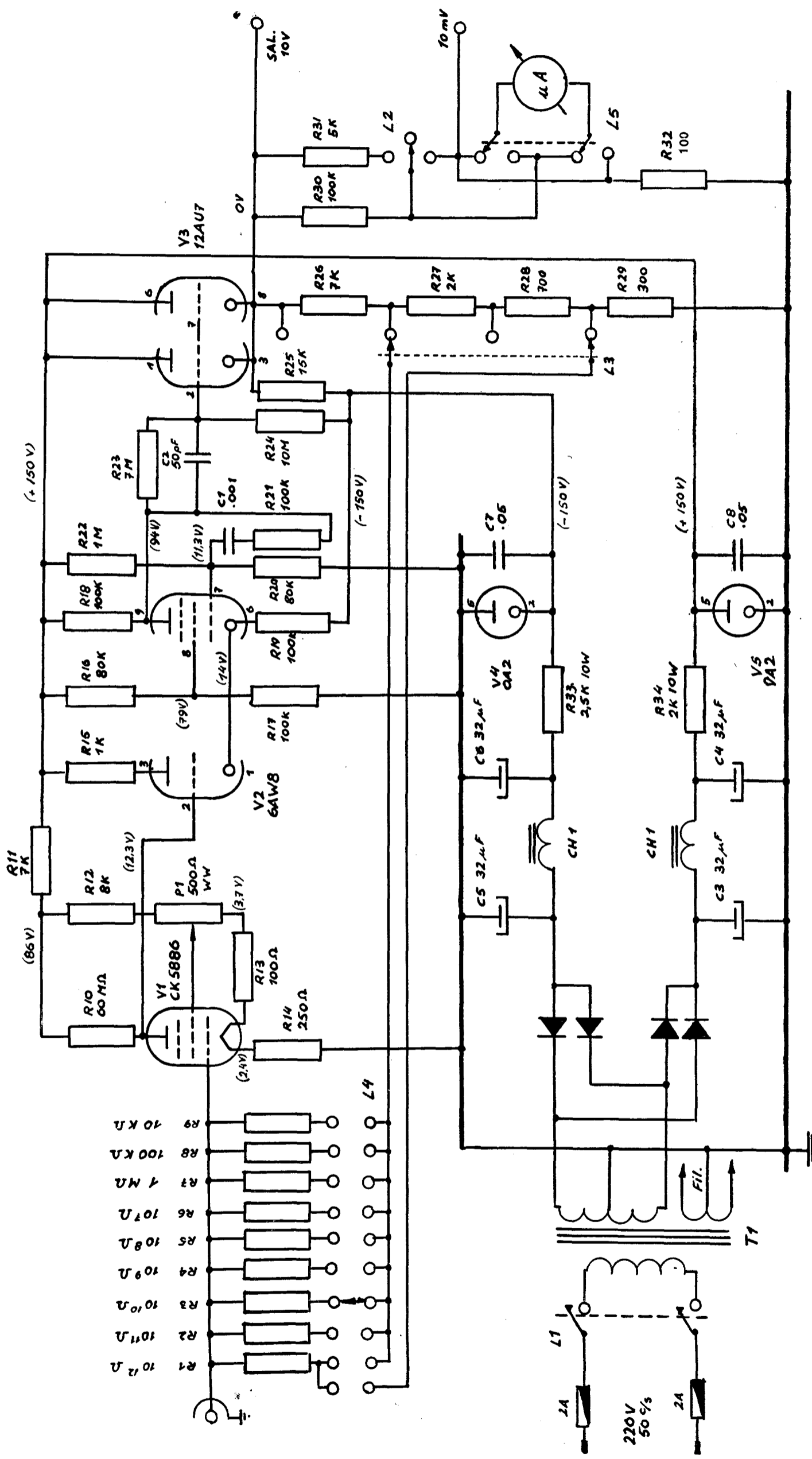
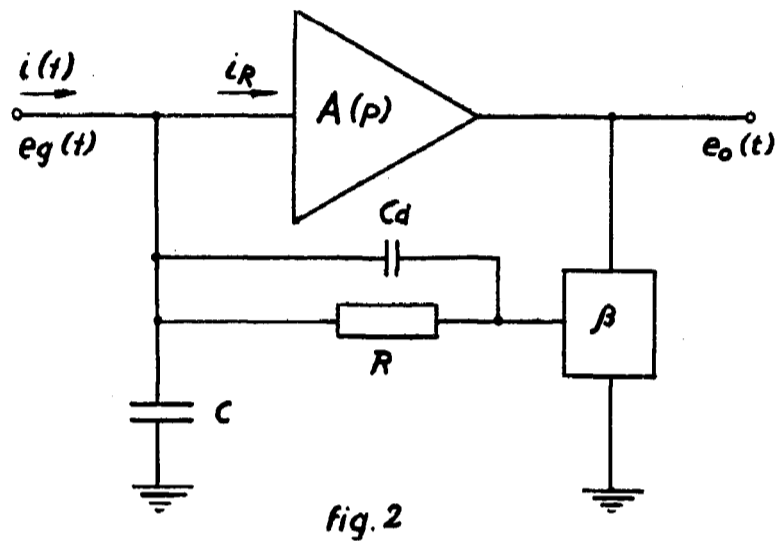


Fig. 1

$$\frac{E_o(p)}{I(p)} = -\frac{R}{\beta} \frac{1}{1 + \frac{1}{\beta A(p)}} \frac{1}{1 + p \left[RC_d + \frac{RC}{1 + \beta A(p)} \right]} \quad (3)$$



Si suponemos además que la transferencia del amplificador es del tipo

$$A(p) = \frac{K}{1 + p\Theta} \quad , \text{ resulta}$$

$$\frac{E_o(p)}{I(p)} = -\frac{R}{\beta} \frac{1}{1 + K\beta} \frac{1}{1 + p \left[RC_d + \frac{\Theta + RC}{K\beta + 1} \right] + p^2 \Theta R \frac{C_d + C}{K\beta + 1}}$$

Se ve que si $\Theta \ll RC$ y además $C_d \ll C$

$$\frac{E_o(p)}{I(p)} = -\frac{R}{\beta} \frac{1}{1 + K\beta} \frac{1}{1 + p \frac{R}{K\beta + 1} \left[C + C_d (K\beta + 1) \right]}$$

donde se ve claro que todo se comporta como un circuito RC con una constante de tiempo

$$\frac{R}{K\beta + 1} \left[C + C_d (K\beta + 1) \right] \simeq \frac{R}{K\beta} (C + C_d K\beta)$$

si $K\beta \gg 1$.

Esta expresión de la constante de tiempo nos dice que hay que tener sumo cuidado en mantener C_d lo más bajo posible si quere-

mos obtener constantes de tiempo bajas. La forma de conseguir una C_d sumamente pequeña, es por medio de un blindaje electrostático.

En nuestro caso en el rango de 10×10^{-12} amperes

$$R = 10^{12} \text{ ohm} \quad \beta = 1$$

siendo $K = 5 \times 10^3$, $C = 5000 \text{ pF.}$ y si suponemos $C_d = 1 \text{ pF.}$, la constante de tiempo será

$$\frac{R}{K\beta} (C + C_d K \beta) = \frac{10^{12} (5000 \times 10^{-12} + 10^{-12} \times 5 \times 10^3)}{5 \times 10^3} = 2 \text{ seg}$$

IMPEDANCIA DE ENTRADA

La impedancia de entrada será

$$Z_i(p) = \frac{E_g(p)}{I(p)}$$

Teniendo en cuenta las expresiones (1) y (3), se obtiene

$$Z_i(p) = \frac{R}{\beta} \frac{1}{A(p) + \frac{1}{\beta}} \frac{1}{1 + p \frac{R}{1 + \beta A(p)} [C + C_d (1 + \beta A(p))]}$$

Si suponemos de nuevo $\beta A(p) \gg 1$, resulta

$$Z_i(p) = \frac{R}{\beta A(p)} \frac{1}{1 + p \frac{R}{\beta A(p)} [C + C_d \beta A(p)]}$$

Es decir, visto desde la entrada el instrumento, es equivalente a una capacidad $C + C_d \beta A(p)$ en paralelo con una resistencia $\frac{R}{\beta A(p)}$. Esto es interesante pues nos dice que la impedancia de entrada es βK veces menor que R para frecuencias bajas.

ESTABILIDAD DEL CERO

Para simplificar, supondremos en lo que sigue directamente tensiones y valores de corriente continua.

Si llamamos e_B a la tensión de corrimiento referida a la entrada, podemos escribir

$$e_o = -K (e_g + e_B) \quad (4)$$

$$\frac{e_g - \beta e_o}{R} = i \quad (5)$$

de nuevo se ha despreciado la corriente de reja. Introduciendo (5) en (4) y despejando e_o , resulta

$$e_o = -\frac{KR}{1 + K\beta} i - \frac{K}{1 + K\beta} e_B$$

y si $K\beta \gg 1$, se obtiene

$$e_o \simeq -\frac{R}{\beta} i - \frac{1}{\beta} e_B$$

ESTABILIDAD DE CERO POR VARIACION EN UN PUNTO INTERMEDIO DEL AMPLIFICADOR

Consideramos el circuito de la Fig. 3.

Suponemos $i_R = 0$ y $K = K_1 K_2$, ahora tendremos

$$e_o = K_2 [e_g K_1 + e_1] \quad (6)$$

$$e_g = \beta e_o \quad (7)$$

Introduciendo (7) en (6) y despejando, nos queda

$$e_o = \frac{K_2}{1 - \beta K_1 K_2} e_1$$

En nuestro caso, en el rango de 3×10^{-13} amperes

$$k = 0.03 \quad K_1 = 110 \quad K_2 = 45$$

De donde

$$e_o \simeq -\frac{45}{0.03 \times 5000} e_1 = -0.3 e_1$$

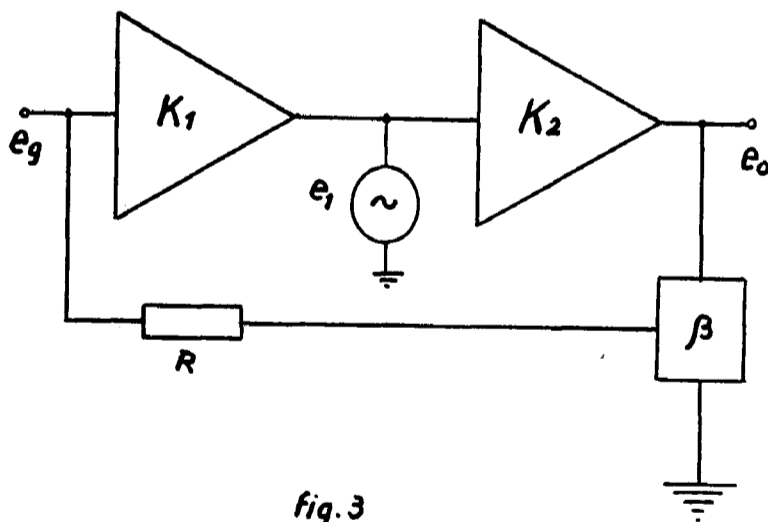


fig. 3

INFLUENCIA DE LA CORRIENTE DE REJA

Suponemos ahora que la corriente de entrada es nula, tendremos

$$e_o = -K e_g \quad (8)$$

$$\beta e_o - e_g = i_R R \quad (9)$$

Introduciendo (8) en (9) y despejando, resulta

$$e_o = \frac{KR}{\beta K - 1} i_R$$

si $\beta K \gg 1$, tendremos

$$e_o \simeq \frac{R}{K} i_R$$

Es decir, la transferencia tanto para la corriente de entrada como para la corriente de reja es la misma. Siendo esta última inferior a 3×10^{-15} amperes, en el rango de máxima sensibilidad, sólo representará un 1 % del fondo de la escala.

LISTA DE MATERIALES

V1	CK5886	Raytheon	o	DF703	Telefunken
V2	6AW8				
V3	12AU7				
V4	OA2				
V5	OA2				
R1	10 ¹² ohms	2 %	½ Watt	Victoreen	
R2	10 ¹¹ ohms	»	»	»	
R3	10 ¹⁰ ohms	»	»	»	
R4	10 ⁹ ohms	»	»	»	
R5	10 ⁸ ohms	»	1 Watt	Film de carbón	
R6	10 ⁷ ohms	1 %	»	»	»
R7	10 ⁶ ohms	»	½ Watt	»	»
R8	100 K	»	»	»	»
R9	10 K	»	»	»	»
R10	60 M	1 %	1 Watt	»	»
R11	7 K	»	»	»	»
R12	8 K	»	»	»	»
R13	100 ohms	»	½ Watt	»	»
R14	250 ohms	»	»	»	»
R15	1 K	5 %	»	»	»
R16	80 K	»	1 Watt	»	»
R17	100 K	»	»	»	»
R18	100 K	»	»	»	»
R19	100 K	»	2 Watt	»	»
R20	80 K	1 %	½ Watt	»	»
R21	100 K	10 %	»	»	»
R22	1 M	1 %	»	»	»
R23	7 M	5 %	1 Watt	»	»
R24	10 M	»	»	»	»
R25	15 K	10 %	2 Watt	»	»
R26	7 K	1 %	½ Watt	»	»
R27	2 K	»	»	»	»
R28	700 ohms	»	»	»	»
R29	300 ohms	»	»	»	»
R30	100 K	»	»	»	»
R31	5 K	10 %	»	»	»

R32	1 K	1 %	½ Watt	Film de carbón
R33	2,5 K		alambre 10 Watt	
R34	2 K	»	»	
C1	1000 pF.		cerámica	
C2	50 pF.		poliestirene	
C3/C4	32 + 32 uF. × 450 Volts		Electrolíticos	
C5	32 uF. × 450 Volts		»	
C6	32 uF. × 450 Volts		»	
C7	.05 uF. 600 Volts		Papel	
C8	.05 uF. 600 Volts		»	
L1	Llave interruptora doble.			
L2	Llave a palanca 3 posiciones 1 polo.			
L3	Llave de esteatita 5 posiciones 2 polos, Centralab, Cat. N° 2.505.			
L4	Llave de esteatita 11 posiciones 2 polos 2 pisos, Centralab, Cat. N° 2.513.			
L5	Llave inversora doble			
P1	Potenciómetro 500 ohms alambre.			

- 1 Microamperímetro 0-100 μ A.
- 1 Transformador UCOA T-810.
- 2 Impedancias UCOA C-060.
- 3 Fichas banana H.
- 1 Conector teflón Amphenol Cat. n° 83-798
- 2 Zócalos 7 p. baquelita.
- 1 Zócalo 9 p. baquelita.
- 1 Zócalo 9 p. Centralab.
- 1 Ficha 220 para cable.
- 1 Ficha 220 para chassis.
- 1 Ojo de buey.
- 1 Lámpara 6,3 Volt, 150mA.
- 2 Portafusibles.
- 2 Fusibles 2A.
- 1 Chassis CNEA chico completo.
- 8 Rectificadores Selenar 100mA. 220 Volts.
- Cables, Alambres y tornillos.