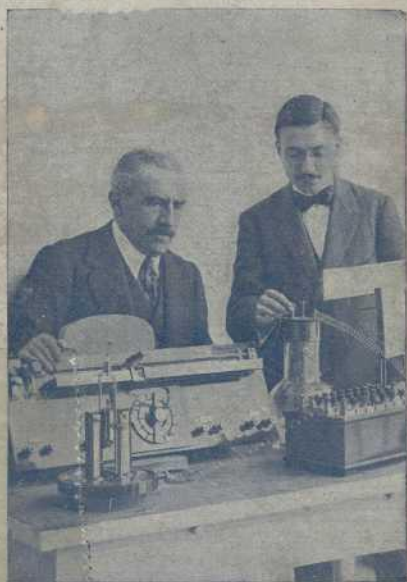


BIBLIOTECA DEL ELECTRICISTA PRÁCTICO

MEDICIONES ELÉCTRICAS
DE LABORATORIO

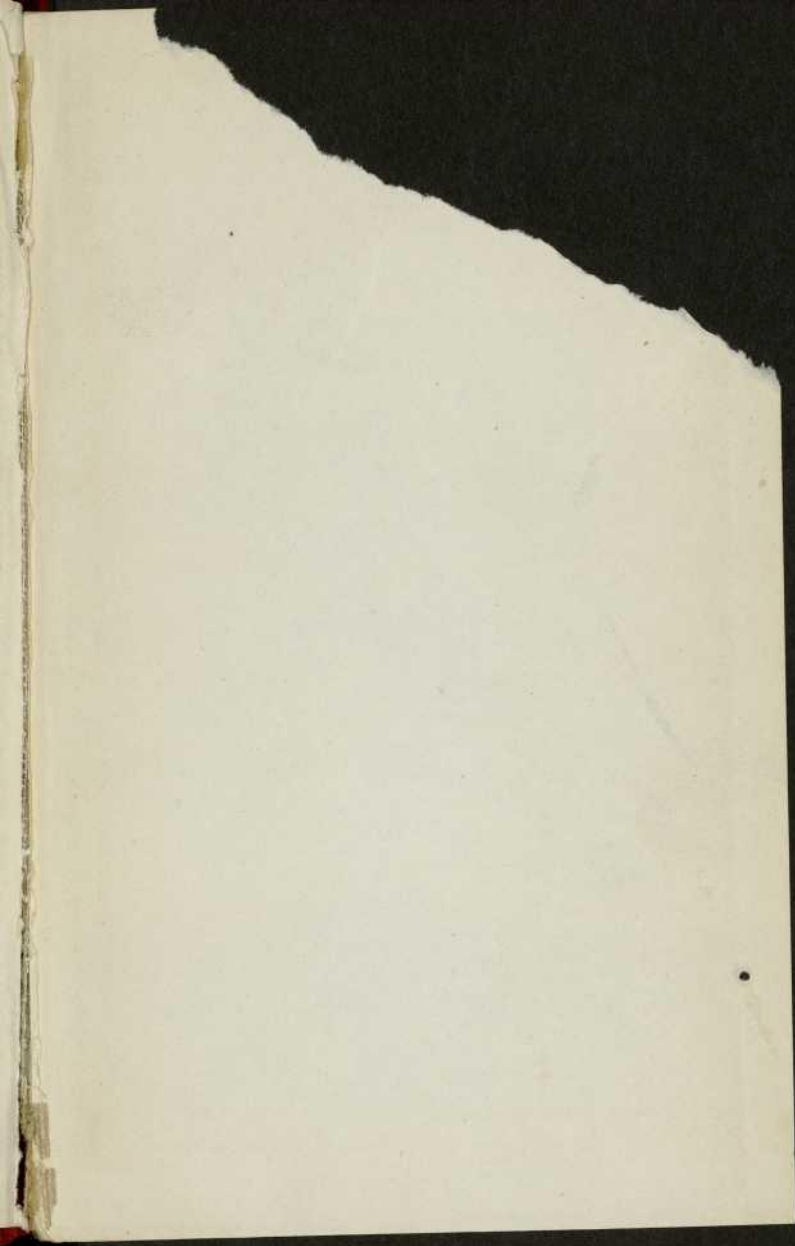


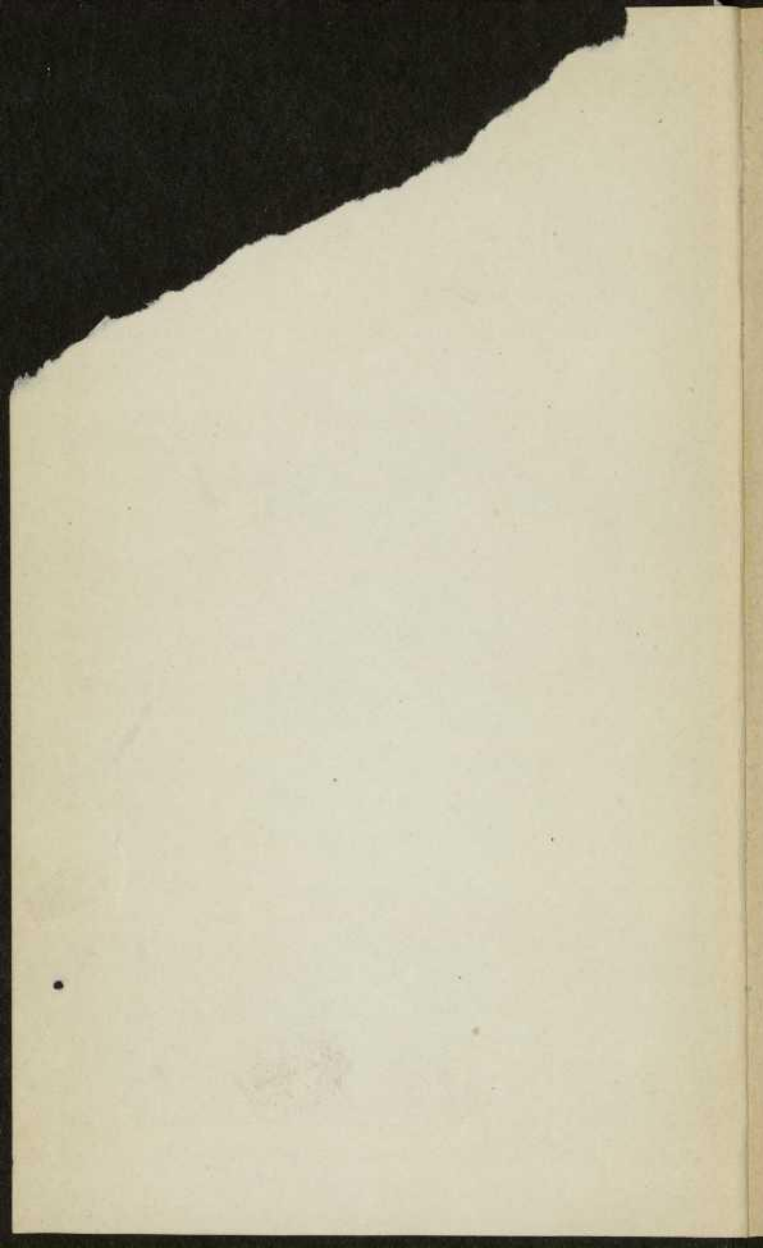
GALLACH EDITOR

18

BARCELONA



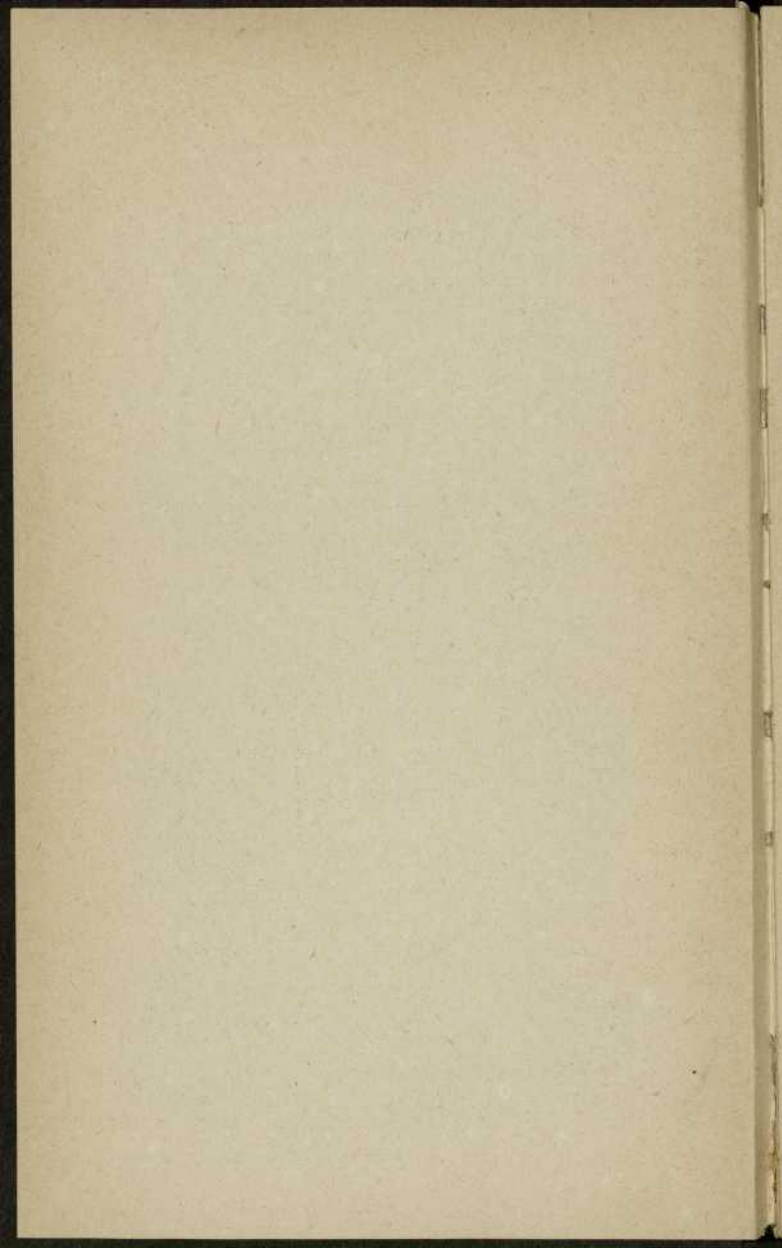




25451

~~21676~~

MEDICIONES ELÉCTRICAS
DE LABORATORIO



BIBLIOTECA DEL ELECTRICISTA PRÁCTICO

SERIE PRIMERA (Volúmenes 1 a 30)

PUBLICADA BAJO LA DIRECCIÓN

DE

D. RICARDO CARO Y ANCHÍA

LICENCIADO EN CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS, OFICIAL DE TELÉGRAFOS
Y PROFESOR DE ELECTROTECNIA Y TELEGRAFÍA EN LA
ESCUELA INDUSTRIAL DE TARRASA

TOMO XVIII

MEDICIONES ELÉCTRICAS DE LABORATORIO

— POR —

D. RICARDO CARO Y ANCHÍA

SEGUNDA EDICIÓN

B.P. BURGOS
N.º
N.T. 92862
C.P.
25451

« CALPE »

Compañía Anónima de Librería, Publicaciones y Ediciones

MADRID-BARCELONA

ES PROPIEDAD
Derechos de traducción
reservados

PRELIMINARES

Al estudiar el Sistema Cegesimal en el tomo II de esta BIBLIOTECA, definimos ya las distintas unidades: magnéticas, electromagnéticas y electrostáticas, pertenecientes a dicho sistema, y dedujimos las relaciones que existían entre unas y otras.

Dijimos allí que las unidades cegesimales, universalmente adoptadas, eran las únicas que se empleaban para formular, y, por lo tanto, que todas las relaciones, deducidas matemáticamente, entre cantidades magnéticas o eléctricas, venían dadas en unidades del sistema C. G. S.; pero que en la práctica no podían adoptarse la mayor parte de dichas unidades, porque las cantidades medidas con ellas resultarían expresadas por números excesivamente grandes o excesivamente pequeños.

Para evitar estos inconvenientes se toman como unidades prácticas las siguientes:

De intensidad	el amperio.
» cantidad	el culombio.
» potencial	el voltio.
» potencia	el vatio.
» trabajo	el julio.
» resistencia	el ohmio.
» conductancia	el mhoio.
» capacidad	el faradio.
» autoinducción	el henrio.
» inducción	el gausio.
» flujo	el maxvelio.

Las mediciones eléctricas y magnéticas de laboratorio se reducen a la comparación precisa de estas unidades con las magnitudes homogéneas que se han de medir.

Para medir una cantidad magnética o eléctrica con gran precisión, hacen falta aparatos muy sensibles y de gran confianza, que sólo en un laboratorio eléctrico bien montado se encuentran.

Claro está que mediciones parecidas pueden y deben efectuarse a cada instante en la industria; pero en ella estas mediciones se obtienen con aparatos de poca precisión y de lectura directa y aproximada, puesto que las cantidades que en la industria se manejan son muy grandes y un pequeño error en su medida resulta despreciable.

La medida de una cantidad se efectúa, generalmente, comparándola con otra de su misma especie, tomada como unidad.

Cuando se trata de fenómenos tan fugaces como la electricidad, es difícil la comparación de sus magnitudes con otras cantidades, que resulten perfectamente definidas para ser tomadas como unidad. En tal caso, se recurre en la industria a medir dichas magnitudes por los efectos que producen sobre aparatos calibrados escrupulosamente y aceptados como aparatos patrones o tipos.

La teoría de estos aparatos, su mecanismo y manejo, es cuanto nos proponemos desarrollar en este tomo.

CAPÍTULO PRIMERO

MEDIDA DE INTENSIDADES. VOLTÁMETROS, GALVANÓMETROS Y ELECTRODINAMÓMETROS

Patrón de intensidad de corriente. — La corriente eléctrica que atraviesa un conductor, es un fenómeno temporal, que no se presta a la construcción de un patrón permanente con que comparar otras corrientes. El único procedimiento que cabe para definir el amperio, es por su acción electrolítica.

Según acuerdo del congreso de Chicago, *el amperio es la intensidad de una corriente que, atravesando una disolución de nitrato de plata, deposita 0.001118 gramos de plata por segundo.*

Voltímetros. — De esta manera de definir el amperio resulta que el aparato fundamental para medir la corriente eléctrica debe ser el *voltímetro* (tomo II, pág. 41) formado con electrodos de plata y electrolito de nitrato del mismo metal.

La forma y dimensiones de los voltímetros, varían según su calibre; pero en general, están constituidos por un vaso de cristal lleno del líquido electrolítico en el que se sumergen los electrodos conductores de la corriente que se ha de medir. Los electrodos, en forma de plancha, son: el cátodo (polo negativo) de platino, y el ánodo (polo positivo) de plata. Este último consta de dos planchas, que se sitúan una a cada cara del cátodo, con el fin

de aprovechar las dos caras de la plancha de platino.

Al atravesar la corriente el baño electrolítico, se produce una descomposición, y la plata se deposita sobre la plancha de platino; el aumento de peso que ésta sufre, por unidad de tiempo, dividido por la constante 0'001118, nos da el número de amperios de la corriente, supuesta ésta de intensidad constante. Si se trata de una corriente variable, el valor hallado será la media de las intensidades durante el tiempo considerado.

En los voltímetros de calibre grande, se substituyen los ánodos de plata por dos planchas de cobre y el electrolito por una disolución de sulfato cúprico. En tal caso la constante 0'001118 debe ser reemplazada por el equivalente del cobre 0'000329, por ser éste los gramos de cobre que deposita un amperio sobre el cátodo.

Es claro que este método de medición, no es aplicable a corrientes alternas (tomo II, pág. 41).

Otros aparatos empleados. — El empleo del voltímetro como medidor de corrientes representa un gasto continuo de plata, que hace poco industrial este sistema de medición. Para conocer la intensidad de una corriente, pueden emplearse otros aparatos que evitan dicho gasto, los cuales se clasifican en diversos grupos según el fundamento de su construcción.

Se llaman *galvanómetros* los aparatos que miden la intensidad mediante la acción de las corrientes sobre los imanes. En éstos puede ser fija la corriente y movable el imán, o recíprocamente, fijo el imán y movable la corriente.

Electrodinamómetros son los basados en la acción de una corriente sobre otra.

Por fin, *aparatos térmicos* son los que aprecian la corriente por el efecto Joule que produce en un conductor resistente.

Galvanómetros de imán movable. — Un galvanómetro de imán movable, se reduce en esencia al conjunto de un multiplicador, formado por N vueltas de hilo, y un imán suspendido por su centro de gravedad, para que pueda girar libremente. Las vueltas del multiplicador, se suponen siempre bastante juntas para que sean despreciables sus distancias relativas, comparadas con el tamaño del carrete y con su distancia al imán. La suspensión del imán, debe hacerse con hebras de capullo de seda y sin torsión, con objeto de disminuir el par resistente.

La construcción y empleo de estos aparatos, puede fundarse en cualquiera de los principios establecidos al estudiar la acción de los circuitos sobre los imanes. (Tomo I, cap. VII).

Se construyen también aparatos de estos tipos, cuyo objeto no es medir la corriente, sino sencillamente acusar su paso por un conductor. A estos aparatos se les llama *galvanoscopios*.

Entre los galvanómetros propiamente dichos, estudiaremos sólo algunos tipos escogidos entre los de mayor uso.

Galvanómetro Kelvin. — Este aparato está fundado en la acción de un carrete multiplicador sobre un punto de su eje (tomo I, pág. 120).

El multiplicador, es un carrete circular, de radio b , que supondremos proyectado en MN (fig. 1). La aguja imantada está sostenida por un eje A , que puede moverse a lo largo del eje OA del carrete. Las desviaciones se observan mediante un índice AD de aluminio, unido perpendicularmente a la aguja.

Dispondremos el aparato de manera que, no teniendo corriente el multiplicador, la aguja se oriente bajo la acción del magnetismo terrestre y el índice marque el cero de la graduación.

Al enviar una corriente al multiplicador, la

aguja se desviará de su posición de equilibrio hasta un ángulo α , bajo las acciones del campo terrestre y del multiplicador, que son respectivamente

$$AB = h \quad \text{y} \quad AC = \mathcal{H} = Li \frac{b}{c^3};$$

siendo h la intensidad del campo magnético terrestre, L la longitud del hilo devanado en el ca-

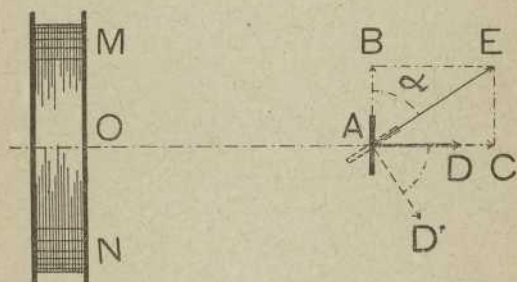


Fig. 1

rrete, i la intensidad de la corriente que circule por él, b el radio y c la distancia entre A y el borde M del carrete (tomo I, pág. 121).

En el triángulo rectángulo ABE , se verifica (tomo II, pág. 14)

$$\text{tang } \alpha = \frac{BE}{AB} = \frac{AC}{AB} = \frac{Li b}{h c^3}$$

de donde

$$i = \frac{hc^3}{Lb} \text{ tang } \alpha = A \text{ tang } \alpha. \quad [1]$$

El coeficiente A , se llama *factor de reducción del galvanómetro* y en el aparato que estudiamos, depende de la distancia c del borde del multiplicador al eje de la aguja. El galvanómetro Kelvin podrá medir intensidades muy variadas, escogiendo convenientemente aquella distancia. También se varía la sensibilidad del aparato colocando próximo a la aguja, un imán que aumente o disminuya la intensidad del campo magnético terrestre.

Si la graduación de la escala que recorre el índice, se hace marcando tangentes y no grados del

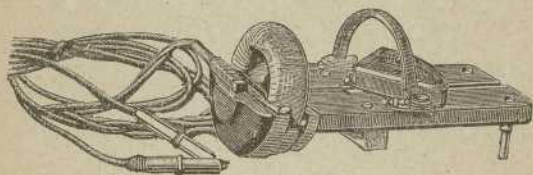


Fig. 2

ángulo girado, podrá tomarse como fórmula del galvanómetro

$$i = A\alpha$$

La figura 2 representa en conjunto un galvanómetro Kelvin construido por la casa James White, de Glasgow. En la parte media de la figura se ve el multiplicador en un plano vertical y en la parte derecha una caja en forma de sector circular, conteniendo la aguja imantada y la indicadora. Toda esta caja corre, guiada por una ranura, a lo largo del aparato, para variar la distancia c entre el multiplicador y la aguja imantada.

Sistema astático. — La aguja imantada que forma parte del galvanómetro, está constantemente

influida por el campo magnético terrestre, y, por lo tanto, sus indicaciones obedecerán a los efectos combinados de este campo y del creado por el multiplicador. Para evitarlo en algunos tipos, se constituye el sistema movable por dos agujas imantadas NS y $S'N'$ (fig. 3), que tengan perfectamente iguales sus momentos magnéticos e invariablemente unidas la una a la otra. Dada la posición relativa de sus polos, es evidente que el campo magnético terrestre tendrá un efecto perfectamente nulo, y el sistema movable se fijará en cualquiera posición, sin orientación determinada. A este sistema se le llama *par astático*.

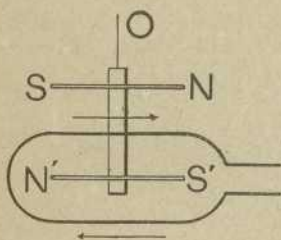


Fig. 3

Si estas agujas se colocan en el galvanómetro, una dentro y otra fuera del multiplicador, como se indica en la figura, es fácil comprobar que los efectos de la corriente sobre las dos

agujas, son concordantes para que el sistema movable gire en un sentido determinado. Basta para ello personificar la corriente según la regla de Ampère (tomo I, página 114).

En efecto, si la corriente circula por el carrete multiplicador en el sentido de las flechas de la figura, el observador colocado entre las dos agujas de manera que la corriente le entre por los pies y le salga por la cabeza, puesto de cara a NS , verá desviarse el polo N a su izquierda, y puesto de cara a $N'S'$ el que debe desviarse a su izquierda es el polo N' , resultando concordantes las acciones de la corriente sobre el par astático.

Un galvanómetro provisto de un par astático no es influido por el campo magnético terrestre y, por lo mismo, éste no determina sobre el par una

Un galvanómetro provisto de un par astático no es influido por el campo magnético terrestre y, por lo mismo, éste no determina sobre el par una

orientación fija. Para que el índice vuelva al cero, cuando no pasa corriente por el carrete, es preciso que el galvanómetro tenga un imán permanente situado de manera que cada uno de sus polos atraiga a una aguja distinta del par; de este modo el galvanómetro está siempre orientado y puede medir en cualquiera posición. El mismo fin se conseguiría suspendiendo el eje del par de un muelle, templado para que el índice quede en reposo sobre el cero de la escala.

Lectura de ángulos. — La lectura de las desviaciones sufridas por la aguja imantada de un galvanómetro, puede ser *directa* o *por reflexión* de un

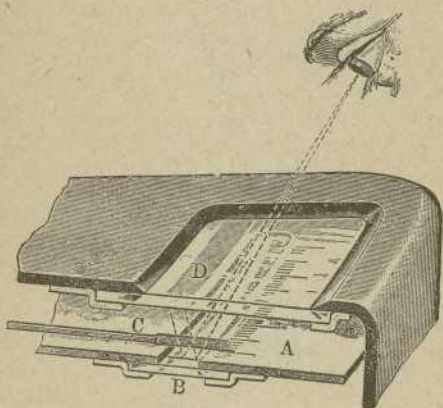


Fig. 4

rayo de luz, o de una imagen observada en el espejo del sistema movable.

Para la lectura directa, deben adherirse a las agujas, índices ligeros, lo más largos y finos posible. Estos índices se mueven en un plano horizontal

paralelo al del limbo graduado, pero distante de él para que no pueda sufrir rozamientos. Con objeto de evitar *errores de paralaje* en la lectura de las desviaciones, se coloca (fig. 4) debajo del limbo

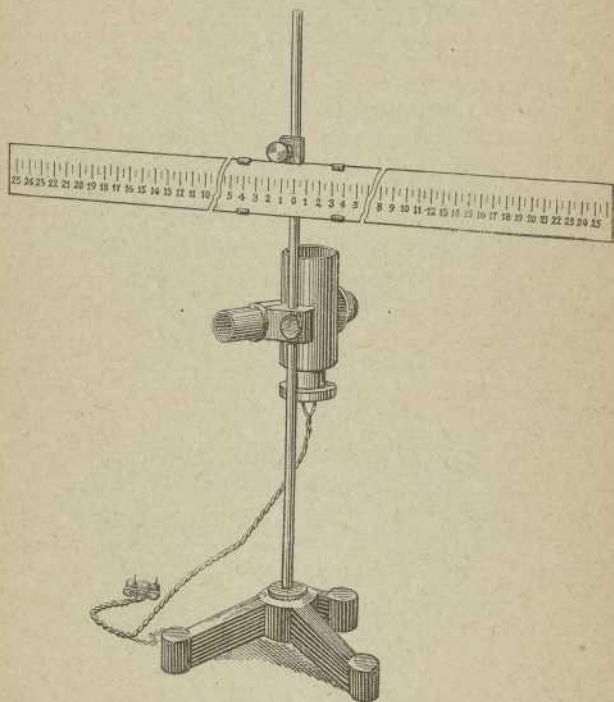


Fig. 5

A un espejo *B*, y al leer, se mira con un solo ojo, procurando que el índice *C* y su imagen en el espejo se confundan. De este modo, veremos el índice proyectado sobre el limbo graduado, según un plano que seguramente es vertical.

Para la lectura por reflexión, el eje de la aguja debe estar provisto de un espejito que gire con él. A este espejito se le manda un rayo de luz, procedente de una lámpara (fig. 5), convenientemente situada, y el rayo reflejado por el espejo se recibe sobre una escala graduada en la cual se lee el ángulo de desviación.

Empleando por índice un rayo luminoso, puede hacerse tan largo como se quiera sin más que aumentar la distancia entre la escala y el galvanómetro. Cuanto más largo sea el índice, mayor

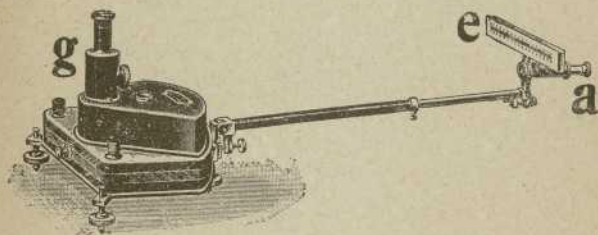


Fig. 6

amplitud tendrá el arco correspondiente al ángulo desviado por la aguja y más aproximación se tendrá en su lectura.

La lectura por reflexión, también puede hacerse colocando un antejo *a* con retículo, bajo el cero de la escala *e* y orientado de manera que vea la imagen del cero en el espejito del galvanómetro *g*. (Figura 6).

Cuando el espejo se desvíe, por el antejo se verá la imagen de otro punto de la escala cuya distancia al cero nos dará idea del ángulo girado por la aguja magnética.

En los procedimientos de reflexión, debe tenerse en cuenta que *el ángulo girado por el rayo lumi-*

noso, es siempre doble del ángulo girado por el espejo.

En efecto, sea OL (fig. 7), el rayo incidente producido por la lámpara L , el cual se confunde con el reflejado, cuando el espejo ocupa la posición AB de reposo, que debe ser perfectamente normal al rayo. Si el espejo gira un ángulo $BOB' = \alpha$, la normal ON del espejo, girará también un ángulo $\alpha = LON$; pero en virtud de las leyes de reflexión, el rayo reflejado OR , debe formar también con la normal el ángulo $\alpha = NOR$; luego la desviación sufrida por el rayo luminoso reflejado, es $LOR = 2\alpha$ doble que la experimentada por el espejo.

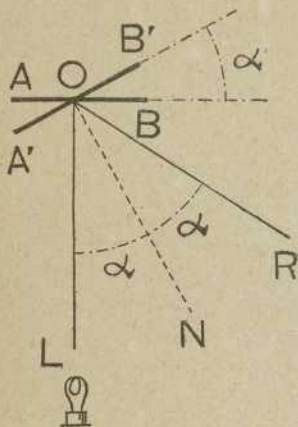


Fig. 7

Escala para la reflexión.— Para los procedimientos de reflexión puede emplearse una escala arquada, que tenga el centro en el hilo de suspensión de la aguja imantada; en este caso la lectura puede darnos directamente ángulos.

Si la escala empleada es recta, deberá colocarse normalmente al rayo incidente. Su división podrá hacerse en partes iguales cualesquiera, en milímetros, por ejemplo, con tal que se exprese en las mismas unidades la distancia l del espejo a la escala.

En este caso el valor del ángulo se encuentra aproximadamente por la fórmula

$$\alpha = \frac{d}{2l} - \frac{d^3}{6l^3}$$

representando d , la desviación leída en la escala; y l , la distancia del espejo a la escala.

La figura 5 corresponde a una escala recta montada sobre el mismo soporte que lleva la linterna, de la que parte el rayo de luz que el espejo del galvanómetro ha de reflejar sobre la escala. Coincidiendo con el eje del soporte, se ve el cero de la escala, cuya graduación sigue en ambos sentidos, puesto que la aguja del galvanómetro puede desviarse a la derecha o a la izquierda, según sea el sentido de la corriente que recorre el carrete.

Galvanómetro de tangentes. — Si en el galvanómetro Kelvin suponemos la aguja imantada colocada invariablemente en el centro del multiplicador, será $c = b$ y la fórmula [1] se reducirá a

$$i = \frac{hb^3}{Lb} \operatorname{tang} \alpha = \frac{hb^2}{L} \operatorname{tang} \alpha = A \operatorname{tang} \alpha.$$

Aquí el factor de reducción A , es constante y, por lo tanto, la intensidad es solamente proporcional a la tangente del ángulo girado. Por eso, a este aparato se le llama galvanómetro de tangentes.

Si el ángulo α fuese muy pequeño, podría aceptarse como fórmula práctica

$$i = A\alpha$$

La figura 8 representa un galvanómetro de tangentes construido por la casa Hartmann et Braun. El multiplicador está formado por dos circuitos independientes terminados en cuatro bornes que se ven en el centro de la figura. Puede emplearse un solo circuito, o los dos en serie o en paralela para aumentar la sensibilidad del aparato, o los dos en oposición para que el galvanómetro funcione como diferencial. Cada uno de los circuitos tiene

trescientas vueltas del hilo fino, con aislamiento de seda.

El imán tiene forma de aguja, sostenida por un eje vertical, y con dos largos índices de aluminio en sus extremos. El limbo graduado sobre el cual se mueve, tiene en la parte central el espejo para afinar la lectura de la desviación.

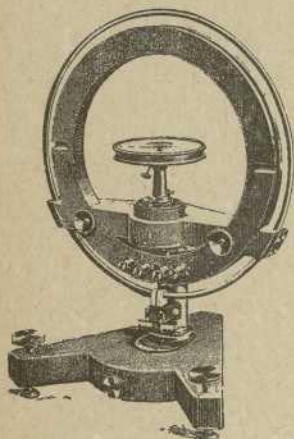


Fig. 8

Las oscilaciones de la aguja se amortiguan por la presencia de un disco de cobré en el cual nacen corrientes de Foucault.

El aparato se apoya en tres pies, siendo uno de ellos invariable y los otros dos regulables mediante tornillos calzadores.

El multiplicador puede girar alrededor de su eje vertical, para orientar convenientemente la aguja.

Este aparato puede emplearse también en las medidas absolutas de intensidad y de resistencia, utilizando entonces como multiplicador una sola espira constituida por un anillo de cobre que se ve en la parte exterior del carrete circular.

La casa Carpentier construye también galvanómetros de tangentes, con el multiplicador dividido en tres carretes paralelos, calculando sus diámetros y situaciones para que los tres circuitos estén siempre sobre una misma esfera.

Galvanómetro de senos. — Está formado por un multiplicador circular, como el de tangentes, pero que puede girar alrededor de un diámetro vertical

y en cuyo centro va una aguja imantada suspendida por un hilo (fig. 9).

La diferencia entre este galvanómetro y el anterior, estriba únicamente en la longitud de la aguja imantada, que puede ser cualquiera en el de senos, pero que ha de ser muy corta en el de tangentes.

Para operar, se colocan el multiplicador y la aguja en el plano NS del meridiano magnético y cuando se lanza la corriente y la aguja se desvía, se hace girar el multiplicador siguiendo a la aguja, hasta que se consiga el equilibrio quedando la aguja en el plano del carrete.

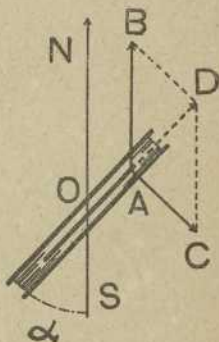


Fig. 9

En esta posición, la acción de la tierra será $AB = h$, la del carrete $AC = \mathcal{K}$, y la resultante AD , en prolongación de la aguja.

En el triángulo rectángulo ADB , recto en D , se verifica que (tomo II, pág. 15),

$$BD = AB \operatorname{sen} \alpha$$

de donde

$$\operatorname{sen} \alpha = \frac{BD}{AB} = \frac{AC}{AB} = \frac{\mathcal{K}}{h}$$

y siendo $c = b$, resulta

$$\mathcal{K} = \frac{Li}{b^2}$$

y substituyendo queda

$$\operatorname{sen} \alpha = \frac{Li}{hb^2}$$

de donde despejando i , resulta

$$i = \frac{h b^2}{L} \operatorname{sen} \alpha = A \operatorname{sen} \alpha$$

resultando *la intensidad de la corriente proporcional al seno de la desviación.*

La figura 10 representa un galvanómetro de senos construido por la casa Carpentier de París.

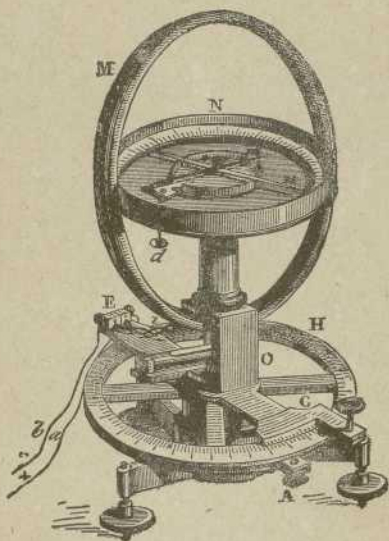


Fig. 10

En la parte inferior se ve el limbo graduado H para medir el ángulo girado por el plano del multiplicador, y un nonio E para hacer las lecturas con la mayor exactitud.

El aparato lleva también limbo graduado *N* para medir las desviaciones de la aguja imantada, lo cual permite emplearlo también como galvanómetro de tangentes, sin más que substituir la aguja larga por una aguja más corta.

Galvanómetro de Thomson (fig. 11). — La parte magnética está constituida por dos series de tres

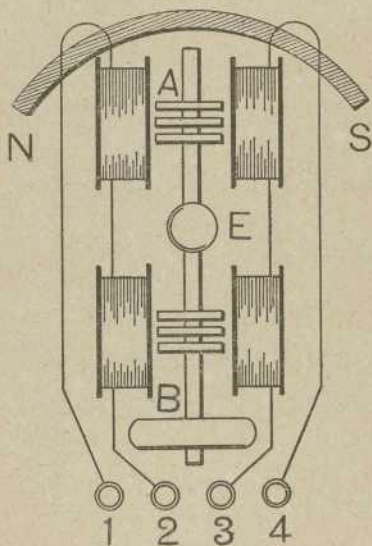


Fig. 11

agujas imantadas y unidas a un vástago rígido *AB*, de manera que formen un sistema astático. El mismo vástago, lleva adherido un espejito *E*, para acusar, por reflexión, sus movimientos, y una aguja ancha de alumnio *B*, que amortigua las oscilaciones.

El vástago pende de una hebra de capullo de seda, y cuando el aparato no funciona, se alarga el hilo, hasta que todo el sistema movable descansa por su parte inferior en la peana.

La orientación de las agujas imantadas debe ser completamente indiferente, si el sistema que forman es perfectamente astático. Por si no lo fuera, el aparato lleva en su parte superior un imán curvo *NS*, sostenido por una varilla y que puede situarse en un plano vertical cualquiera, para neutralizar la acción directiva que pudiera ejercer la tierra. Otro objeto puede cumplir este imán, y es, que situándole más o menos alejado de las agujas, influirá de un modo variable en la movilidad de éstas, con lo cual la sensibilidad del aparato se altera entre límites muy amplios.

El circuito eléctrico del aparato, está constituido por cuatro carretes opuestos dos a dos, para formar campos magnéticos en los cuales se mueven los sistemas de agujas. La conexión entre los carretes es la indicada en la figura, viniendo los extremos de los devanados a cuatro bornes 1, 2, 3, 4, para realizar diversas combinaciones. Podrán sumarse en tensión 1 y 4 para empalmar el circuito exterior. Si la corriente es intensa, se puede emplear uno solo de los circuitos 1 . 2 ó 3 . 4. En cambio, si la corriente fuese de escaso potencial, pueden sumarse en paralela ambos circuitos.

Por fin, el aparato puede funcionar como *galvanómetro diferencial*, dando entrada a las corrientes por los bornes 2 y 3, y salida por los 1 y 4.

Para aumentar aún las combinaciones, se construyen modelos de ocho bornes, correspondiendo cada dos de ellos al circuito de un solo carrete.

El rayo luminoso que se envía al espejo para su reflexión, procede generalmente de una lámpara de petróleo, de mecha plana, o de una bombilla eléctrica, de filamento rectilíneo y vertical. El objeto es conseguir una imagen luminosa

rectilínea, para determinar fácilmente su posición.

La figura 12 representa un galvanómetro Thomson, construido por la casa Carpentier. Contiene cuatro carretes, como el de la figura esquemática II:

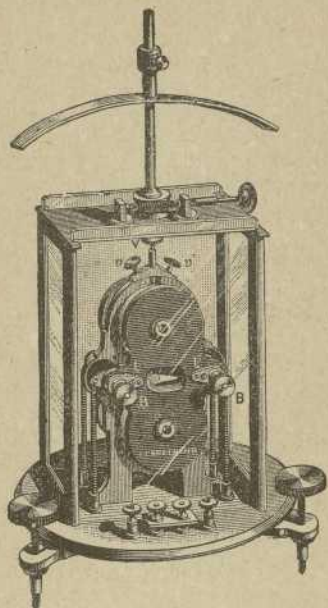


Fig. 12

pero viéndose en el sentido de los ejes, los dos primeros ocultan a los otros dos.

En la parte media ocupada por los carretes, existe el hueco por donde se ve el espejo unido a las agujas movibles.

El aparato tiene cuatro bornes, y en el dibujo aparecen unidos los dos intermedios para conectar en serie los cuatro carretes.

Galvanómetro Broca. — Parecido al tipo Thomson, es el galvanómetro Broca representado esquemáticamente en la figura 13.

Lo notable de este aparato, que lo diferencia del Thomson, es su sistema magnético, constituido

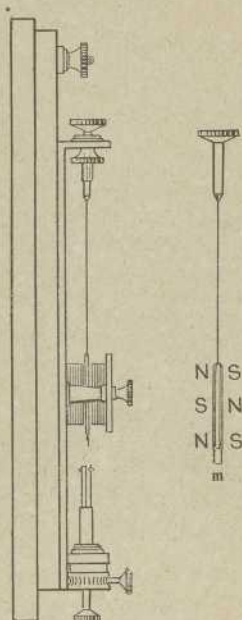


Fig. 13

por dos imanes cuyos ejes son verticales y separados uno de otro 2 mm. próximamente. Cada uno de estos imanes está formado por un tubo de acero magnético de 0'7 mm. de diámetro exterior y de 35 mm. de largo. La imantación de estos tubos

está hecha en forma que presente tres polos cada uno, como se indica en la figura; dos del mismo nombre en los extremos y un polo consecuente de nombre contrario en el centro. Además, se imantan las dos barras de un mismo aparato, de manera que sus polos consecuentes sean de signos contrarios.

Como la suma algebraica de las masas magnéticas de una barra imantada es siempre cero, es evidente que la masa magnética del polo consecuente, será en valor absoluto igual a la suma de las masas de los polos extremos. De aquí resulta que el sistema de las dos barras verticales, equivale a la existencia de cuatro barras horizontales, muy cortas, y orientadas dos en un sentido y dos en otro, es decir, formando un sistema astático perfecto.

El conjunto de las dos varillas imantadas, pende de una hebra de capullo de seda de 8 cm. de largo y lleva en su parte inferior un espejito diminuto. Todo el sistema movable pesa solamente 2 decigramos.

El circuito galvanométrico está formado por dos carretes de 28 mm. de diámetro y 8 mm. de espesor. Estos tienen sus ejes en línea recta y dejan entre sus bases próximas un espacio de dos milímetros donde se aloja el sistema movable.

El aparato tiene cuatro bornes para combinar los carretes en serie, en paralela o en oposición.

El sistema movable se suspende a conveniente altura para que los polos consecuentes se sitúen precisamente en el centro de los carretes.

El Broca, lo mismo que el Thomson, tiene un imán director colocado bajo el sistema magnético, pudiéndose variar su situación respecto a aquél para que ejerza mayor o menor influencia.

El aparato funciona con milésimas de microamperio.

Factor de reducción y constante de un galvanómetro. — En los galvanómetros que hemos estudiado, hemos aceptado, como fórmula práctica

$$i = A\alpha$$

llamando *factor de reducción* del galvanómetro al coeficiente A .

En la fórmula anterior, cuando α valga uno, resultará

$$i = A$$

luego, el coeficiente A debe ser *el valor de la corriente que produce la unidad de desviación*. Así, por ejemplo, si en un galvanómetro Thomson el rayo reflejado se desvía un milímetro, cuando el galvanómetro está recorrido por 2 microamperios, el factor de reducción será 2 y la fórmula

$$i = 2\alpha$$

nos dará microamperios, expresando α en milímetros.

En los aparatos de reflexión, se considera generalmente la *constante del galvanómetro*, en lugar del coeficiente de reducción. La constante k del galvanómetro, es la *inversa del factor de reducción*, de manera que

$$i = \frac{I}{k}\alpha$$

Cuando por el galvanómetro circule la unidad de corriente, tendremos

$$I = \frac{\alpha}{k}$$

y este quebrado nos dice que k representa *la desviación correspondiente a la unidad de corriente*.

En el galvanómetro del ejemplo anterior, es evidente que cada microamperio producirá una desviación de 0'5 mm.

La constante será 0'5, y la fórmula

$$i = \frac{I}{0'5} \alpha$$

que es la misma hallada anteriormente.

El coeficiente de α , sea factor de reducción o sea la constante del galvanómetro, puede hallarse experimentalmente, enviando al aparato una intensidad i conocida y observando la desviación α que produce. Tendremos

$$A = \frac{I}{k} = \frac{i}{\alpha}$$

Galvanómetro balístico. — El galvanómetro balístico tiene por objeto *medir la cantidad q de electricidad que atraviesa un circuito, sobre el cual se verifica la descarga de una corriente instantánea.*

Su constitución es análoga a la de los demás galvanómetros, y en él se verifica que *la cantidad de electricidad que lo atraviesa, es proporcional al seno de la semidesviación.*

Para un mismo galvanómetro y un mismo punto de experimentación, puede tomarse como fórmula práctica

$$q = B \operatorname{sen} \frac{\alpha}{2}$$

Para que la lectura de la desviación sea cómoda, convendrá emplear agujas magnéticas pesadas, que se muevan lentamente.

El factor de reducción B será *el número de microculombios que producen la desviación de 180°.*

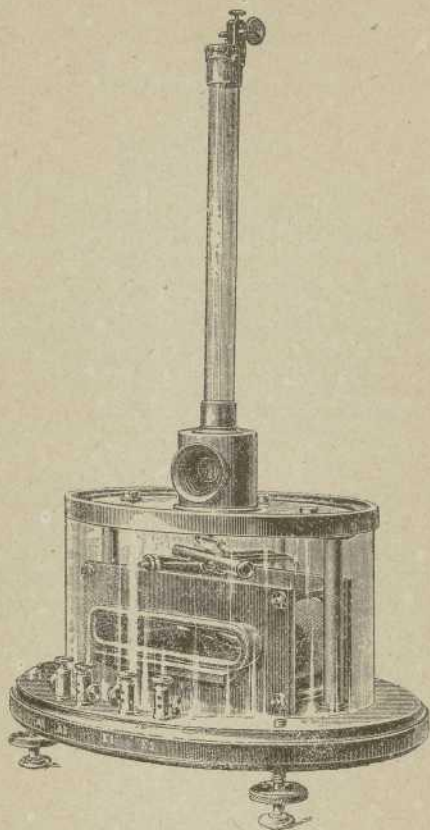


Fig. 14

Galvanómetro balístico Hartmann y Braun.— Este aparato representado en la figura 14 tiene como órgano movable un sistema astático formado

por imanes tubulares de 120 mm. de longitud, suspendidos de una larga hebra de capullo de seda.

El multiplicador es de dos devanados, teniendo, por lo tanto, el aparato, cuatro bornes de empalme que permiten combinar los devanados en serie, en paralela o en oposición, pudiéndose también emplear uno solo de ellos.

Las desviaciones se observan por reflexión, para lo cual el órgano movable lleva su correspondiente espejo.

Galvanómetros de imán fijo. — En estos aparatos se crea un campo magnético intenso, mediante un imán permanente, fijo, *I*, o un electroimán excitado por una corriente constante. En el seno de este campo, se suspende libremente un carrete *B*, formado por varias vueltas de hilo, al cual se hace llegar la corriente que debe medirse (fig. 15).

Si en reposo, el plano de las espiras del carrete es paralelo a las líneas de fuerza del campo magnético, cuando por las espiras circule corriente, se orientarán éstas buscando un máximo de flujo por su cara sur (tomo I, pág. 119).

En el interior del carrete movable, puede ponerse un núcleo de hierro *C*, fijo, separado de las piezas polares del imán, por un entrehierro suficiente para que pueda moverse el carrete. De este modo, se disminuye la reluctancia del circuito magnético y se aumenta el flujo.

Si las piezas polares son interiormente cilíndricas y el núcleo lo es también, el entrehierro

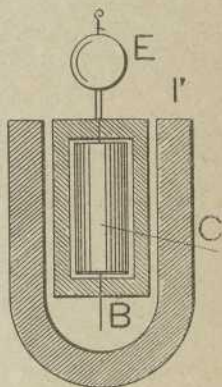


Fig. 15

tendrá una longitud uniforme, el campo será radial, y el flujo cortado por el carrete, será constante en cualquiera de sus posiciones.

Fórmulas de galvanómetro de imán fijo. — Un circuito recorrido por una corriente i , moviéndose en un campo magnético y cortando un flujo \mathcal{C} , exige un trabajo $\mathcal{C}i$ (tomo I, pág. 119). Si en lugar de un solo circuito se mueve un carrete de N vueltas, el trabajo será

$$J = N\mathcal{C}i$$

Podemos hallar una expresión mecánica de este mismo trabajo. Si los costados verticales del carrete movable distan r del eje de giro y sometidos a una fuerza f giran un ángulo θ , gastarán un trabajo

$$J = r\theta f$$

y de las dos expresiones de J se deduce

$$i = \frac{rf}{N\mathcal{C}}\theta$$

El producto rf es el *par de rotación* y se representa por C . Además, el flujo \mathcal{C} puede expresarse como producto de la intensidad \mathcal{H} del campo por la superficie S del carrete. Tendremos finalmente

$$i = \frac{C}{N\mathcal{H}S}\theta = A\theta = \frac{1}{k}\theta$$

Estos aparatos son aperiódicos, es decir, *fijan la posición del carrete sin oscilar*. Este efecto es debido a las corrientes inducidas en el carrete al moverse en el campo magnético, que, según la ley de Lenz, lo inmovilizan rápidamente (tomo I, capítulo IX).

Galvanómetros Deprez d'Arsonval. — El galvanómetro clásico de imán fijo, es el tipo Deprez d'Arsonval, del cual la figura 16 representa un modelo construido por la casa Carpentier.

Estos galvanómetros inventados en 1881, se han generalizado de tal modo, que han quitado impor-

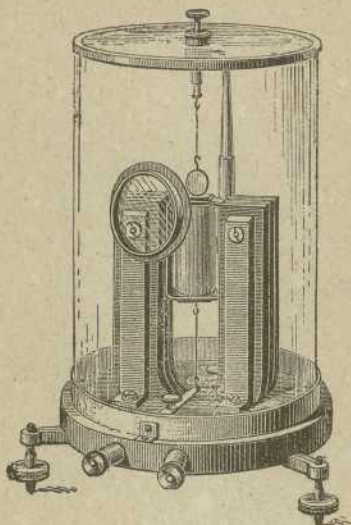


Fig. 16

tancia a los de imán movable en muchísimas aplicaciones.

Dentro de este tipo se construyen modelos de extremada sensibilidad, propios para mediciones de laboratorio, y modelos portátiles, sencillos y robustos, propios para las mediciones industriales.

El bastidor o circuito movable comunica con los bornes del aparato mediante la suspensión que

está constituida por hilos de plata de 10, 12 ó 15 centésimas de milímetro.

La sensibilidad del aparato depende de las espiras de hilo que formen el bastidor. El modelo más sensible que anuncia la casa Carpentier, acusa una desviación de un milímetro, en una escala colocada a un metro del espejo, con una corriente de 5×10^{-10} amperios, teniendo su bastidor una resistencia de 18000 ohmios y durando su oscilación completa 25 segundos.

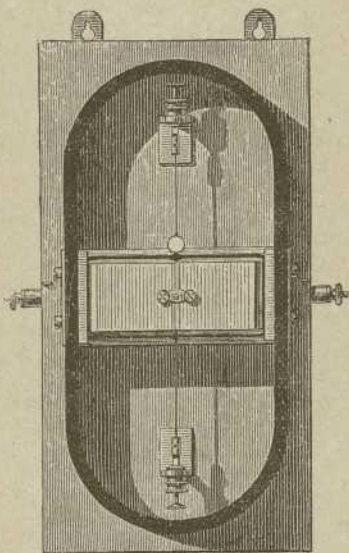


Fig. 17

Galvanómetro balístico de imán fijo. — La figura 17 representa un galvanómetro balístico tipo Deprez d'Arsonval, modelo de pared construido por la casa Carpentier.

El bastidor o marco movable tiene unas dimensiones mucho mayores que en los tipos no balísticos, alcanzando 64×150 mm., con objeto de darle gran momento de inercia para que sus oscilaciones sean lentas. El circuito contiene 500 espiras de hilo de cobre, de 0'1 mm.

El campo magnético está creado por dos imanes permanentes en forma de U, reunidos por sus polos del mismo nombre, es decir, sumados en cantidad.

Se disminuye la reluctancia del circuito magnético, como en los otros galvanómetros, mediante un cilindro de hierro dulce, fijo, concéntrico con las piezas polares y separado de ellas por un espacio suficiente para dar paso al carrete movable.

Con 0'01 de microamperio, la imagen luminosa recorre un milímetro sobre una escala situada a un metro del aparato.

Funcionando como balístico, la descarga instantánea de un microculombio produce una desviación de 40 a 50 milímetros.

Una oscilación completa del sistema movable, emplea próximamente 8 segundos.

Tipo de lectura directa. — En este modelo (figura 18), el marco movable está suspendido por dos hilos tirantes, según la prolongación de uno de sus

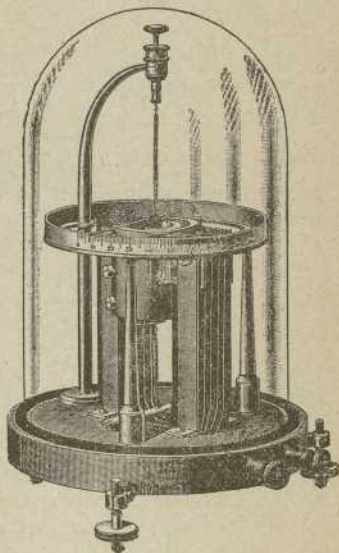


Fig. 18

costados. Su segundo lado vertical se mueve en el campo anular creado por dos piezas polares cilíndricas, fijas sobre las ramas del imán. El costado fijo del carrete está fuera de la acción del campo magnético y con un solo costado influido, las desviaciones son proporcionales a las intensidades, dentro de límites muy extensos.

El marco lleva una aguja encorvada que se mueve sobre una graduación cilíndrica convexa que contiene una división en grados de 0 a 180.

El aparato puede ser graduado directamente en miliamperios y su sensibilidad máxima llega a 0'02 miliamperios por grado de desviación.

Galvanómetro registrador.—La figura 19 representa un galvanómetro construido por la casa Carpentier que deja marcadas en un papel las indicaciones en distintos momentos.

El galvanómetro es de marco movable, con numerosas vueltas de hilo, campo magnético permanente muy intenso y núcleo de hierro, interior al marco, con objeto de mejorar la inducción en el entrehierro. Con todo esto, resulta el galvanómetro sensible y robusto.

El marco mueve a la vez dos índices: uno en la parte anterior del aparato, para la lectura de las desviaciones sobre una escala graduada; el otro, detrás, lleva la pluma del órgano registrador.

La pluma lleva un ligero contrapeso que asegura una presión suficiente sobre el papel. La pluma puede cambiarse fácilmente.

La hoja de papel se introduce en el aparato por una ranura, a manera de buzón, que lleva en la parte superior. Este papel puede ser continuo de longitud ilimitada.

El arrastre del papel se hace eléctricamente, enviando contactos breves a un electroimán que acciona el gatillo de una rueda de escape. El avance del papel seguirá la misma ley que las emisiones de

corrientes y podrá ser: uniforme, variada o función de una variable cualquiera.



Fig. 19

Las emisiones de corriente, se producen con un transmisor cronométrico que construye la misma casa Carpentier.

Electrodinamómetros. — Son aparatos fundados en la acción mutua de dos corrientes. Esencialmente se componen de dos circuitos planos, uno fijo y

otro movable, que situados, de ordinario, en planos perpendiculares, tienden a ponerse paralelos cuando están animados por corrientes eléctricas.

La acción mutua de los dos circuitos, análoga a la de dos hojas magnéticas, será (tomo I, pág. 161):

$$G = \mathfrak{N}ii' \quad \text{o} \quad G = \mathfrak{N}i^2$$

según que los dos circuitos estén recorridos por corrientes desiguales o iguales.

Esta fórmula hace ver que *la acción mutua de los dos circuitos, cuando están recorridos por la misma corriente, depende del cuadrado de ésta, y por lo tanto, no cambiará de signo aunque se invierta el sentido de la corriente.* De aquí resulta, que *estos aparatos estarán indicados para la medición de corrientes alternas.*

Electrodinamómetro Siemens. — El coeficiente \mathfrak{N} depende del producto de las vueltas de ambos carretes, y permaneciendo éste constante, podrán distribuirse los factores de diversas maneras. En el aparato Siemens (fig. 20), se ponen muchas vueltas al carrete fijo, y pocas al carrete movable, ya que éste es el que puede estar influido por el magnetismo terrestre.

Para operar con el electrodinamómetro, se empieza por colocar los carretes en planos perpendiculares, procurando que el muelle de la suspensión del movable, no tenga torsión alguna.

Cuando se lanza la corriente, esta perpendicularidad desaparece, y el muelle queda sometido a una torsión que obliga a restablecer la perpendicularidad en cuanto cesa el paso de la corriente. El ángulo de torsión θ a que se somete el muelle, nos medirá el cuadrado de intensidad.

$$G = \mathfrak{N}i^2 = K\theta \quad \text{o} \quad i = \sqrt{\frac{K\theta}{\mathfrak{N}}}$$

La constante del aparato, será fácil determinarla, mediante un experimento preliminar.

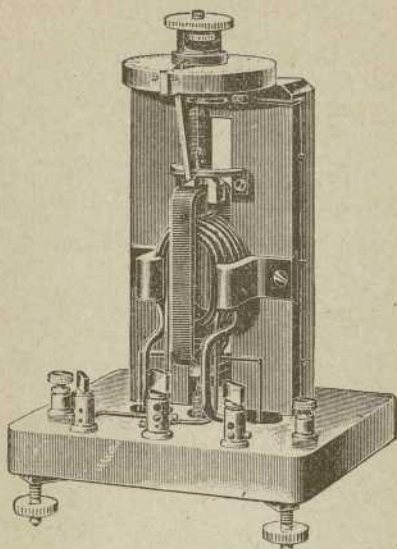


Fig. 20

Balanza electrodinámica de Kelvin. — Este aparato, se compone de un eje de balanza que lleva en cada extremo un carrete que se mueve entre dos carretes fijos (fig. 21). Los seis carretes son recorridos por la misma corriente, pero dirigida de manera que uno de los carretes móviles *A* sea atraído hacia arriba y el otro *B*, hacia abajo. Por el eje corren dos pesos *P* y *P'* cuya acción, en posición conveniente, contrarresta el efecto electromagnético de los carretes. Cuando se consiga el

equilibrio, la acción de la corriente i y el momento p del sistema de pesos, tendrán una relación de la forma

$$i = \frac{I}{K} \sqrt{p}$$

La figura 22 representa una de estas balanzas, construídas por la casa James White de Londres,

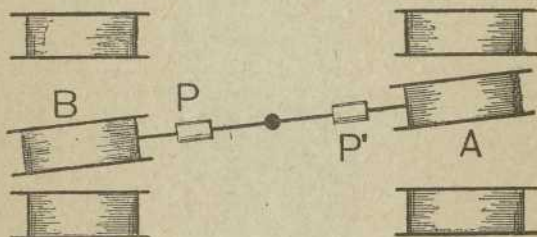


Fig. 21

que permite medir con toda exactitud, corrientes comprendidas entre 0'01 y 0'1 amperios.

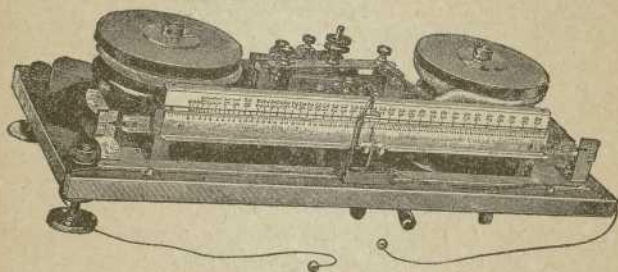


Fig. 22

Se construyen balanzas hasta para 1000 amperios.

Se actúa sobre los pesos móviles mediante dos

correderas accionadas por dos cordones que se ven en la parte anterior de la figura.

Balanza de Pellat. — En este aparato (fig. 23), el carrete fijo es de gran diámetro y tiene su eje horizontal. El movable, interior al primero, tiene el eje vertical y a la mitad de su altura lleva un cuchillo horizontal a manera de eje de báscula,

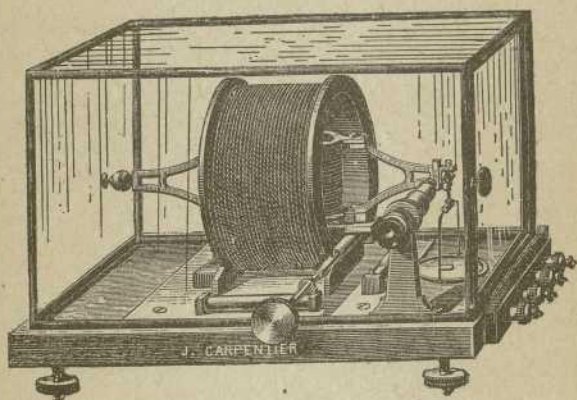


Fig. 23. — Amperio tipo Pellat

que se apoya en dos planos de ágata, tapados en la figura por el carrete fijo.

En la figura se ven bien los dos brazos del eje de balanza. El de la derecha termina en un platillo para colocar pesos, y el de la izquierda, termina en un contrapeso, para que la cruz de la balanza esté en equilibrio cuando los carretes no tengan corriente.

Al lanzar la corriente a los carretes, su acción mutua hace oscilar el interior, que tiende a colocarse paralelo al exterior y levanta el extremo de

la derecha del eje de balanza. Se restablece el equilibrio, colocando pesos en el platillo, y entre estos pesos y la intensidad de la corriente, se verifica una relación de la misma forma que la dada al tratar de la balanza de Kelvin

$$i = \frac{1}{K} \sqrt{p}$$

Las mediciones efectuadas con este aparato dan una aproximación del orden de las diezmilésimas y pueden medirse corrientes comprendidas entre 0'1 y 0'5 amperios.

Una corriente de 0'3 amperios es equilibrada por un peso de 1'5 gramos, luego la constante del aparato es

$$K = \frac{\sqrt{1'5}}{0'3} = 4'08$$

El aparato lleva dos niveles de burbuja que comprueban su horizontalidad, y va montado sobre tornillos calzadores para situarlo en plano bien horizontal. El fiel de la balanza lleva un nonio y, en frente, un anteojo para hacer las lecturas con la mayor exactitud.

CAPÍTULO II

AMPERÍMETROS, SHUNTS Y TRANSFORMADORES DE INTENSIDAD

Amperímetros. — Los galvanómetros y electrodinamómetros estudiados en el capítulo anterior, son propios de laboratorio y destinados sólo a mediciones de precisión. Para el servicio de talleres y fábricas, lo mismo que para poner en manos de los obreros encargados de cuidar las máquinas, se emplean otros galvanómetros industriales o amperímetros, menos exactos, pero de lectura directa, aperiódicos y fácilmente transportables.

Los amperímetros para la medición de corrientes continuas podrán ser del tipo galvanómetro o del tipo electrodinamómetro; pero los destinados a la medición de corrientes alternativas, serán siempre del tipo electrodinamómetro.

Los amperímetros destinados a cuadros de distribución, deben ser insensibles a las acciones magnéticas exteriores y para ello van encerrados en cajas metálicas que les sirven de pantallas magnéticas (tomo I, pág. 50), dejando a la vista solamente la graduación.

Para que la lectura sea rápida, se amortiguan los movimientos del sistema movable, mediante émbolos de aire, agujas de aluminio o utilizando las corrientes de Foucault engendradas por los imanes en las piezas metálicas móviles.

Se aconseja también que los sistemas móviles sean pesados, de gran momento de inercia, con objeto de que oscilen con alguna lentitud. De este modo, se disimulan las oscilaciones rápidas pro-

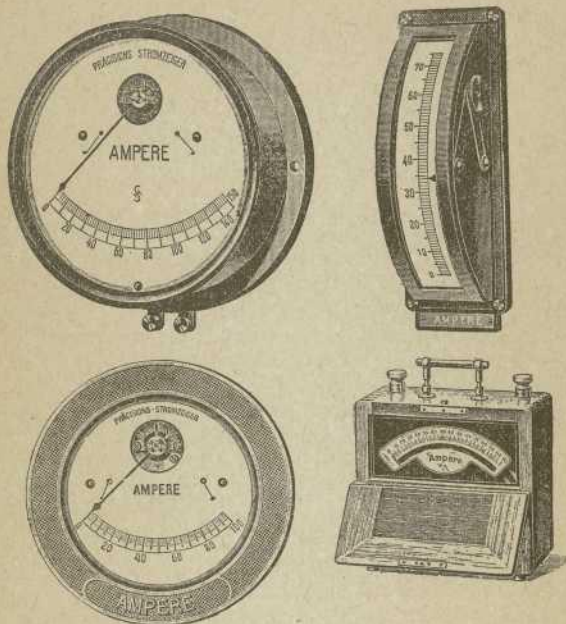


Fig. 24

ducidas por los golpes de émbolo de los motores mecánicos, consumo variable en las líneas, etc.

El amperímetro se monta en serie en el circuito de consumo y, por lo tanto, ha de ser aparato de poquísimas resistencias.

El aspecto exterior de los amperímetros es de formas muy variadas, según el empleo que de ellos

vaya a hacerse, sitio de instalación, situación fija o transportable, y aun gusto del constructor o comprador.

Los tres primeros tipos de la figura 24 son amperímetros para cuadro de distribución, construídos por la casa Siemens Halske. El primero, llamado *tipo de frente*; el segundo, *tipo de perfil*, y el tercero, *tipo empotrado*. En los tres tipos, se construyen modelos especiales que, pueden iluminarse interiormente, como los relojes públicos.

El cuarto tipo, es un modelo transportable, muy apropiado para pruebas.

El amperímetro, como objeto comercial de uso muy extendido, ha tomado formas variadísimas en el mercado, y nos limitaremos a estudiar el fundamento de los principales tipos, sin multiplicar la descripción de modelos, que nos parece perfectamente innecesario.

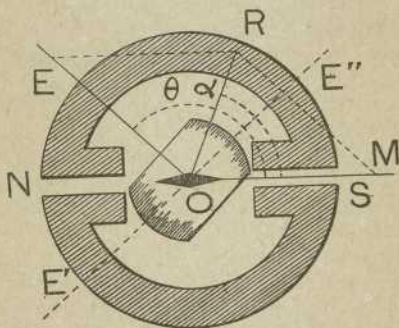


Fig. 25

Amperímetro Carpentier (fig. 25). — Una aguja imantada puede oscilar en un campo magnético potente, formado por dos imanes permanentes, doblados en forma de C y opuestos, como indica

la figura. La aguja está además, envuelta por un carrete formado por unas cuantas vueltas de hilo o lámina de cobre.

Mientras el carrete permanezca inactivo, la aguja tomará la posición indicada en el dibujo, obedeciendo únicamente a la acción magnética; pero cuando se lance la corriente, la aguja quedará sometida a la acción simultánea de dos pares de fuerzas, magnético el uno OM y electromagnético el otro OE ; y la aguja quedará en equilibrio, cuando el par resultante OR tenga sus fuerzas en oposición.

Para tomar la dirección OR , la aguja debe girar un ángulo α , el mismo que girará el índice sobre el limbo graduado que tenga el aparato. La magnitud de este ángulo depende de la componente OE , y ésta, de la corriente que circula por el carrete; de modo que las desviaciones son proporcionales a los amperios.

El ángulo θ , que el eje del carrete forma con OM , debe estar comprendido entre 90° y 180° , para que la sensibilidad del amperímetro sea máxima.

Este amperímetro es sencillamente un galvanómetro de tangentes, en el que los imanes permanentes substituyen el campo magnético terrestre. Tal como está orientado el carrete, resulta el aparato *polarizado* y aplicable sólo para corrientes continuas.

Amperímetro Chauvin y Arnoux.—El fundamento de este amperímetro, es el mismo que el del galvanómetro de Deprez y D'Arsonval, es decir, la acción de un campo magnético fijo, sobre un carrete movable.

Los dos polos NS (figura 26), de un potente imán, están colocados muy próximos uno de otro, y provistos de cavidades hemisféricas, que envuelven a una esfera de acero de menor diámetro.

En el entrehierro resultante, puede moverse un carrete circular provisto de la aguja indicadora del aparato. La corriente llega al carrete por dos muelles de bronce fosforoso, arrollados en espiral como los de los relojes, y que lo mantienen en la

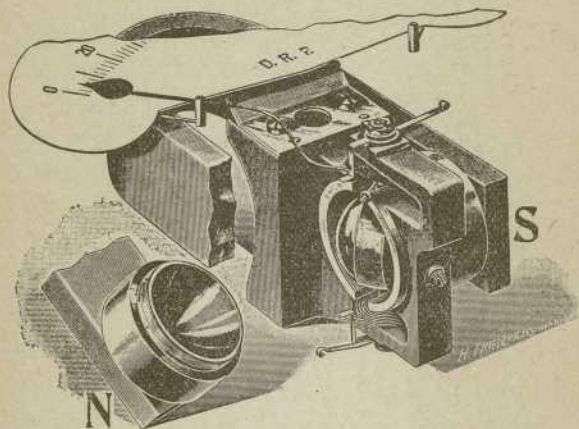


Fig. 26

posición correspondiente al cero, cuando no circula corriente.

El aparato resulta aperiódico, por iguales razones que el galvanómetro D'Arsonval.

Acompañan al amperímetro diversos shunts, con objeto de medir intensidades muy diferentes, aprovechando una sola graduación.

Amperímetro Hummel. — En este tipo de amperímetros, se aprovecha la conocida propiedad de una hoja magnética, que moviéndose en un campo busca siempre un máximo de flujo por su cara sur.

La hoja magnética es una laminilla de hierro dulce, representada de canto por *A* (figura 27), unida invariablemente a un índice ligero *B*.

El sistema *AB*, puede girar con gran facilidad alrededor del punto *O*; de manera, que al circular la corriente por el multiplicador y crearse el campo electromagnético, la laminilla se aproximará al conductor, buscando el mayor flujo. En su movimiento arrastra al índice, que recorre un arco graduado.

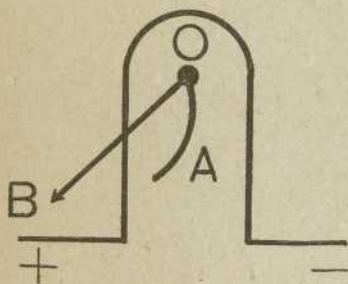


Fig. 27

Para que los arcos recorridos sean proporcionales a la corriente que circula por el multiplicador, es preciso que la imantación de la hoja varíe proporcionalmente a la intensidad del campo. Representando el estado de imantación de la hoja por curvas análogas

a las de la figura 8.^a, del tomo I, se ve que la línea de imantación podrá tomarse como recta, sólo mientras no nos aproximemos al codo *A* de la curva. Esto exige que el multiplicador tenga pocas vueltas.

Además vimos la influencia que sobre la imantación tenía el estado anterior, luego convendrá que la laminilla tenga poca masa, para aminorar los efectos de histeresis.

Amperímetro Dobrowolski.— La corriente que se quiere medir, recorre un solenoide *B* (fig. 28), que actúa sobre un núcleo de succión *N*. Este núcleo pende de una palanca angular, que puede girar alrededor del punto *O* y cuyo peso se halla equi-

librado por el contrapeso *P*. Solidariamente con la palanca angular, gira la aguja indicadora *I*.

Este amperímetro, lo mismo que el de Hummel, se funda en la acción de una corriente sobre un hierro dulce imantado por influencia, constituyendo el tipo llamado *electromagnético*; y se emplea por igual en corriente continua que en corriente alterna, toda vez que la imantación del núcleo cambia con el sentido de la corriente y la acción persiste en el mismo signo.

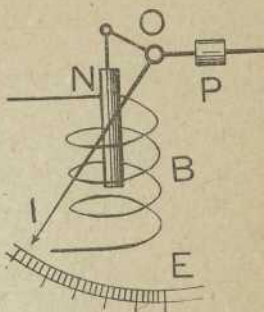


Fig. 28

Amperímetro de Lippmann. — El fundamento de este aparato es totalmente distinto del de los tipos anteriores.

Se compone de dos tubos comunicantes, llenos

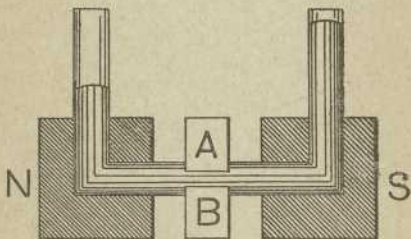


Fig. 29

de mercurio (fig. 29), y un imán potente, cuyos polos *NS* abrazan la rama horizontal del tubo.

La corriente que quiere medirse, se hace llegar a las piezas metálicas *AB*, de manera que, al circular, atraviesa la columna líquida.

Las moléculas de mercurio atravesadas por la corriente, constituyen un circuito elemental que puede moverse en un campo magnético, y la acción de este campo obligará al mercurio a moverse en determinado sentido, desigualándose las alturas en ambas ramas, hasta que la diferencia de peso equilibre la acción del campo.

Amperímetro de inducción Siemens Halske. —

Se compone este aparato de un anillo provisto de

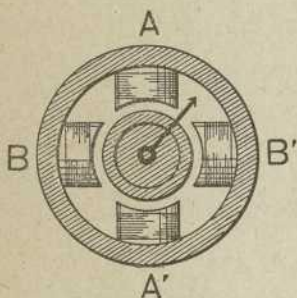


Fig. 30

cuatro núcleos interiores A, A', B, B' (fig. 30), formado todo ello de láminas de palastro para evitar las corrientes de inducción. Sobre los núcleos AA' se arrollan carretes recorridos por las corrientes alternas que quieren medirse y sobre los BB' se arrollan también carretes cerrados, en corto circuito, o sobre una reactancia.

Las corrientes que circulan por AA' darán lugar a corrientes inducidas en los carretes BB' , de igual frecuencia, pero desfasadas en 90° próximamente.

El conjunto de los cuatro carretes, creará en el interior del anillo un campo giratorio (tomo II, pág. 100), y sometido a la acción de este campo, existe un disco de aluminio, que lleva en su eje la aguja indicadora.

El par de rotación producido por el campo giratorio, se contrarresta mediante muelles en espiral y se podrá calibrar el aparato, de manera que el ángulo de equilibrio sea, proporcional a la intensidad de la corriente.

Amperímetro térmico de Hartmann y Braun.—

Un hilo fino de plataplatino, está fijo entre dos puntos AB (fig. 31), llevando en su centro y perpendicularmente, otro hilo CD de latón, fijo en su extremo D . Este último, lleva en E un hilo de seda arrollado a una polea y mantenido tirante por un muelle M .

Cuando AB esté recorrido por una corriente, se dilatará y tomará posición $AC'B$, permitiendo al hilo de latón que tome la posición $C'E'D$.

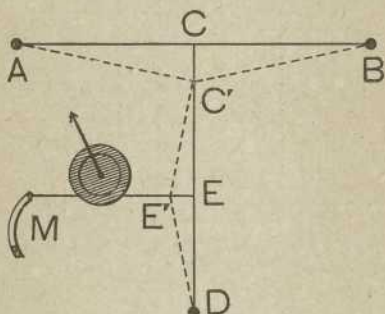


Fig. 31

La rotación del índice corresponderá a la longitud EE' del hilo de seda, y ésta, a la de CC' ; que a su vez depende de la dilatación del hilo AB .

Pero la dilatación del hilo es debida al efecto Joule (tomo I, pág. 100), producido por la corriente al recorrerlo; y como el efecto Joule depende de los amperios, la rotación del índice será proporcional a ellos.

Amperímetro térmico de Chauvin y Arnoux.—

El amperímetro térmico acusa la temperatura del hilo activo y, por lo tanto, su índice se moverá,

cuando la temperatura varíe, aunque el cambio no sea debido a un efecto Joule.

Si la aguja del amperímetro ha de permanecer en el cero, con cualquier temperatura ambiente, mientras no circule corriente por el aparato, es preciso adoptar un *mecanismo compensador de temperaturas*, que corrija las dilataciones del hilo activo que no sean debidas al efecto Joule.

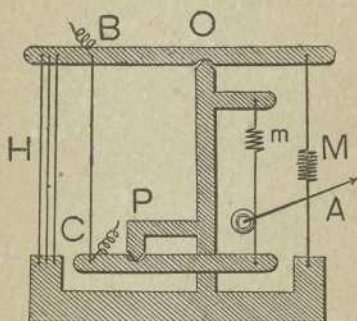


Fig. 32

He aquí el mecanismo empleado por la casa Chauvin.

El hilo activo BC (fig. 32), tiene su extremo superior sujeto a una palanca que puede girar alrededor del punto O , y su extremo inferior sujeto a otra palanca que puede girar alrededor del punto P .

La palanca superior BO , está retenida por tres hilos H , exactamente iguales al hilo activo, y permanece fija, por la tensión del muelle M .

De este modo, si la temperatura ambiente aumenta, se dilatan por igual los cuatro hilos H y BC , con lo cual sube el punto B pero permanece fijo el C . Cuando la corriente dilate solamente el

hilo BC , bajará el punto C , girará la palanca CP y se moverá la aguja A .

La palanca CP tiene sus brazos muy desiguales para que los pequeños movimientos del punto C resulten muy ampliados en A .

Shunt. — Cuando la corriente que conviene medir, es superior a la que produce la máxima desviación del amperímetro, no puede medirse el ángulo de desviación porque la aguja al desviarse sale de los límites de la escala. Con objeto de reducir la desviación de la aguja, se deriva entre los bornes del amperímetro un shunt formado por una resistencia apropiada a la del amperímetro.

Con el empleo del shunt será siempre posible medir grandes intensidades con aparatos de pequeño calibre.

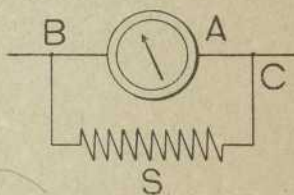


Fig. 33

En el tomo I (página 109), al estudiar la distribución de corriente entre conductores unidos en paralela, convinimos en que los amperios se repartían proporcionalmente a los mohios de cada conductor. Ahora bien, si entre dos puntos BC (figura 33), unimos dos conductores A y S , siendo A un amperímetro y S un shunt, la corriente total de I amperios, en el trayecto BC se descompondrá en dos partes; una i , que pasará por A ; y otra i' , que irá por S . Entre la total y las partes deberá cumplirse la igualdad

$$I = i + i'$$

Si representamos por a y por s , las conductancias de amperímetro y shunt, la proporcionalidad

entre corrientes y conductancias nos permite escribir la proporción

$$\frac{i}{i'} = \frac{a}{s}$$

y aplicando a esta proporción un teorema de aritmética que dice: *en toda proporción, la suma de antecedentes y consecuente de la primera razón, es a su antecedente, como la suma de antecedente y consecuente de la segunda es al suyo*, resulta:

$$\frac{i + i'}{i} = \frac{a + s}{a}$$

y substituyendo $i + i'$ por su igual, resulta

$$\frac{I}{i} = \frac{a + s}{a}$$

de donde

$$I = \frac{a + s}{a} i = Mi \tag{2}$$

El quebrado $\frac{a + s}{a}$ es constante y se denomina *poder multiplicador del shunt*, representándose por M .

La corriente i nos la mide el amperímetro y bastará multiplicarla por M , para saber el valor de la corriente total I , que llega a C .

Para que la multiplicación resulte cómoda se procura que M sea un número sencillo y fácil de emplear como factor, para poder efectuar mentalmente la operación; por ejemplo, 2, 5, 10, 100, 1000...

La conductancia que necesita un shunt, para tener un poder multiplicador M , se calcula partiendo de la igualdad

$$\frac{a + s}{a} = M \tag{3}$$

de donde

$$a + s = Ma$$

y despejando s , tendremos

$$s = Ma - a = (M - 1)a \quad [4]$$

resultando que la *conductancia del shunt debe ser $M - 1$ vez mayor que la del amperímetro*. Así, si queremos que M valga 2, 5, 10, 100, 1000...; tendremos que dar al shunt una conductancia de 1, 4, 9, 99, 999... la del amperímetro.

Ejemplo. Un aparato A (fig. 33), de conductancia 0'5 mhoios puede medir hasta 6 amperios.

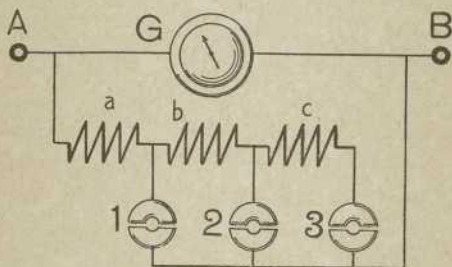


Fig. 34

Conviene medir con este aparato una corriente de 30 amperios y se desea saber qué conductancia deberá tener el shunt S.

De la fórmula [2] deducimos el poder multiplicador

$$M = \frac{30}{6} = 5$$

y la fórmula [4] nos dará la conductancia

$$s = (5 - 1)0'5 = 2 \text{ mhoios.}$$

Por el aparato *A* circularán 6 amperios y por el shunt *S*, 24 amperios. Conoceremos la corriente total multiplicando los 6 amperios leídos en el galvanómetro por 5, poder multiplicador del shunt.

Para disponer de diversos poderes multiplicadores m_1, m_2, m_3, \dots , en un solo aparato, se le da generalmente la disposición indicada en el esquema de la figura 34. Se varía el poder multiplicador, cambiando la posición de la clavija en el conmutador 1, 2, 3.

Las conductancias componentes a, b, c, \dots se calculan mediante la fórmula [4] que, representando por g la conductancia del amperímetro G , se convierte en

$$\begin{aligned} a &= (m_1 - 1)g & a + b &= (m_2 - 1)g \\ a + b + c &= (m_3 - 1)g. \end{aligned}$$

Si, para comodidad en la multiplicación, se desea que m_1 sea 10; m_2 , 100; y m_3 , 1000. Las conductancias serán

$$\begin{aligned} a &= 9g & a + b &= 99g \\ a + b + c &= 999g \end{aligned}$$

bastará restar la primera de la segunda, y la segunda de la tercera para tener el valor de $b = 90g$, y $c = 900g$.

Los shunts para cuadros de distribución, se construyen de láminas o cilindros de manganina montados en paralela entre dos bloques metálicos (fig. 35), y con tan pequeña resistencia, que son atravesados por la total intensidad para que se calculen, cuando se les somete a una diferencia de potencial de 0'1 voltios.

Para esta total carga, se mantienen a temperatura moderada y aún cuando se calienten, no son de temer efectos termoelectricos, gracias a la esmerada elección de los metales que se tocan.

Todos los shunts están provistos de dos pares de bornes; uno grueso, para intercalarlo en el circuito, y otro más pequeño para introducir el amperímetro.

Con el empleo de shunt, puede retirarse el amperímetro sin interrumpir la corriente del circuito

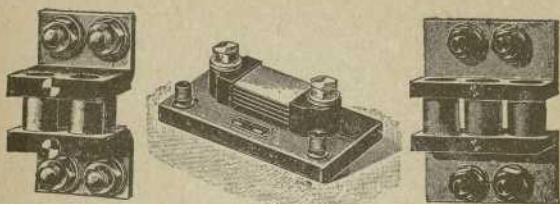


Fig. 35

receptor; para ello basta soltar los hilos del amperímetro y la corriente del receptor continuará circulando por el shunt.

Transformadores de intensidad.— Cuando se trata de corrientes alternas, la reducción de intensidad para el amperímetro se hace mediante un *transformador de intensidad*, que es sencillamente un transformador estático de inducción, cuyo primario, de pocas vueltas, está recorrido por la corriente total, y el secundario, con muchas vueltas, suministra una corriente débil al amperímetro.

Si por el circuito de consumo circula una corriente I y queremos que por el amperímetro circule una corriente m veces menor, es preciso que los números de vueltas N y n , en el primario y secundario, cumplan la condición

$$\frac{N}{n} = \frac{I}{m}$$

Cuando m , poder multiplicador, del transformador, es muy grande se reduce a una sola las

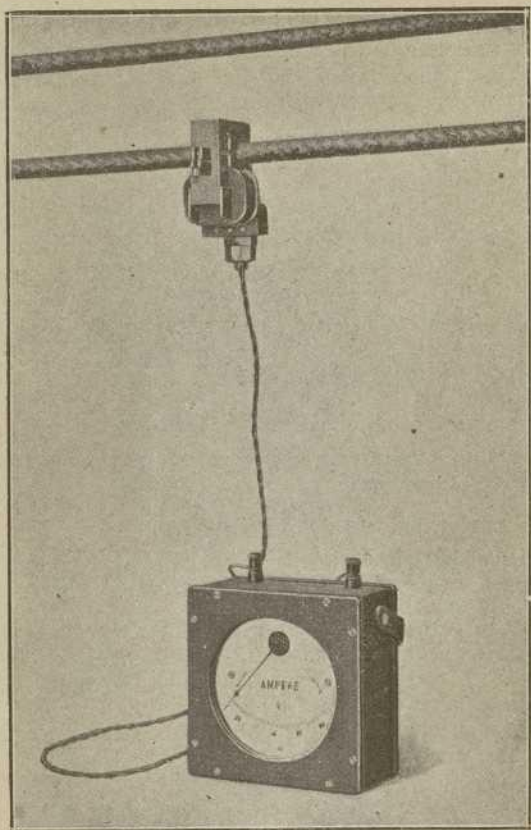


Fig. 36

vueltas del primario, pudiendo aprovecharse para esta vuelta el mismo cable conductor de la instalación (fig. 36).

Los transformadores de este tipo, tienen un sólo devanado, el secundario, y para poder introducir el cable, primario, entre los núcleos del transformador, se abre una de sus ramas (figura 37, 1.^a), y se vuelve a cerrar después de introducido el conductor (fig. 37, 2.^a).

El transformador de la figura 36 tiene el secundario formado por un solo carrete, en cambio el de la figura 37, tiene las espiras del secundario repartidas en dos carretes.

Si la corriente que se ha de medir es de alta tensión, el transformador va metido en un baño

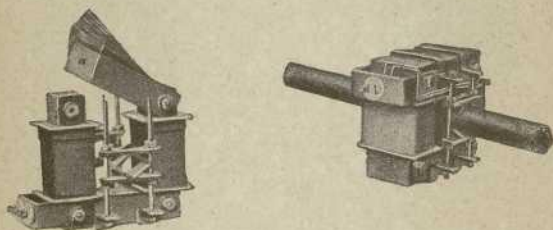


Fig. 37

de aceite, quedando al exterior sólo los bornes de entrada y salida de las corrientes primaria y secundaria.

La figura 38 representa dos transformadores, contruídos por la casa Siemens Halske.

Los dos bornes del circuito de alta, primario, están aislados entre sí por una hoja de mica, y juntos atraviesan un aislador de porcelana que los aísla de la cubierta del transformador. Los dos bornes del secundario están aislados con ebonita o porcelana.

Mientras está funcionando un transformador de intensidad, *no debe interrumpirse nunca su circuito*

secundario, y si conviene retirar el amperímetro deberán antes ponerse en corto circuito los bornes secundarios. Para facilitar esta operación llevan, algunos tipos, una clavija *c* (fig. 38), que al ator-

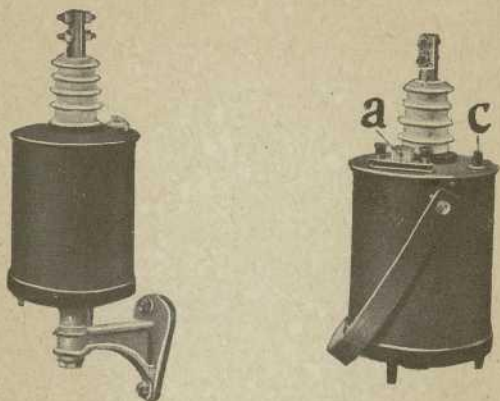


Fig. 38

nillarla en *a*, une en corto circuito los bornes del secundario.

El empleo de transformadores de intensidad es indispensable en las centrales de alta tensión.

Graduación y rectificación de amperímetros. —

Generalmente se gradúan los amperímetros al construirse, por comparación con otros, de cuyo funcionamiento se esté completamente seguro.

Para esta operación, se instalan en serie el amperímetro patrón y el amperímetro nuevo sobre una resistencia variable, para alimentar el conjunto a una tensión apropiada. La graduación se reduce a trasladar las indicaciones del amperímetro patrón a los puntos de la escala del amperímetro nuevo en que se para su aguja.

Interviniendo los imanes en la construcción de estos aparatos, es evidente que pueden sufrir alteraciones con el tiempo, que sean causa de indicaciones completamente erróneas. Por lo tanto, convendrá rectificarlos de cuando en cuando.

La rectificación puede hacerse por comparación como se ha dicho para la graduación, o bien puede recurrirse a uno de los procedimientos siguientes:

1.º Formemos un circuito con un generador cualquiera, el amperímetro y un baño electrolí-

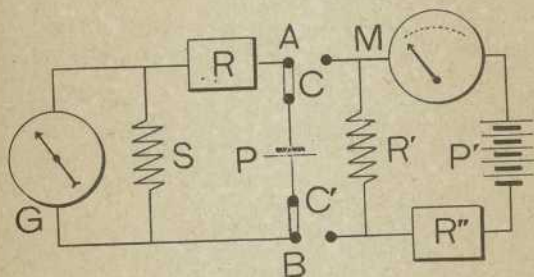


Fig. 39

tico conocido, y dejemos que la corriente circule durante un tiempo T , procurando que sea constante la indicación del amperímetro, durante todo el tiempo del experimento.

El peso del metal depositado nos indicará la cantidad Q de electricidad que ha circulado, y por lo tanto, conoceremos fácilmente la intensidad

$$I = \frac{Q}{T}$$

pudiendo así apreciar la exactitud de las indicaciones del amperímetro.

2.º Empecemos por calibrar un galvanómetro sensible (Thomson o D'Arsonval) de manera que cada una de las divisiones de la escala, corresponda a una centésima de voltio. Para ello formemos un circuito como se indica en la figura 39, con el galvanómetro shuntado GS , una resistencia R y un elemento de pila P , que, para fijar las ideas, supondremos que es un Daniell, tipo de 1'07 voltios.

Tanteando convenientemente R y S , podremos conseguir que la imagen reflejada por el espejo del galvanómetro, pase de la indicación cero a la 107 de la escala, es decir, que el galvanómetro nos aprecie la diferencia de potencial entre A y B , en centésimas de voltio.

Movamos los conmutadores CC' para suprimir el elemento de pila y completar el montaje con una resistencia determinada R' derivada entre los puntos A y B , el amperímetro M , un generador P' y una resistencia variable R'' .

Variando R'' , conseguiremos que varíe la diferencia de potencial entre A y B . Conocida esta diferencia V por el galvanómetro G , se conocerá fácilmente la intensidad que atraviesa el amperímetro.

$$I = \frac{V}{R'}$$

Esto, suponiendo despreciable la corriente que circula por RGS , lo cual exige que R' sea muy pequeña. Generalmente se toma igual a 0'1 ohmios.

Graduación de un aparato en microamperios. —

En las mediciones de precisión, hechas con galvanómetro o con electrodinamómetro, se obtendrá la mayor comodidad en el manejo y lectura de intensidades, cuando el factor de reducción, capítulo I, sea la unidad. Para ello, es preciso *tomar como*

unidad para la escala, la desviación correspondiente a un microamperio; o situar la escala a la distancia conveniente, para que con un microamperio la desviación sea la unidad adoptada.

Se consigue un microamperio, shuntando el aparato con un poder multiplicador m , y enviando E voltios a través de R ohmios, siempre que se cumpla la relación

$$\frac{1}{m} \frac{E}{R} = 10^{-6}$$

Por ejemplo, empleando un Daniell tipo en que $E = 1'07$, y un shunt en que $m = 100$, resultará

$$R = 10^6 \frac{E}{m} = \frac{1070000}{100} = 10700$$

Fórmula de mérito.— Se caracteriza la sensibilidad de un aparato ya graduado, por la resistencia que debe intercalarse en su circuito, para que con un vatio acuse la desviación de una de sus divisiones. A esta reducción se le llama fórmula de mérito, porque cuanto más sensible es el aparato, mayor resulta la resistencia que se ha de intercalar.

Esta resistencia la encontraremos aplicando la ley de Ohm

$$I = \frac{V}{R + g}$$

teniendo en cuenta que I debe ser el factor de reducción en amperios, V igual a uno, R la resistencia que se ha de intercalar y g la del aparato. Sustituyendo y efectuando operaciones resulta

$$R = \frac{1}{A} - g$$

Ejemplo. *En un galvanómetro de 1000 ohmios de resistencia y cuyo factor de reducción vale 2 microamperios, se desea saber qué resistencia necesita para que un voltio produzca la unidad de desviación.*

El factor de reducción en amperios vale 0'000002, luego la resistencia será

$$R = \frac{1}{0'000002} - 1000 = 499000 \text{ ohmios.}$$

CAPÍTULO III

MEDIDA DE POTENCIALES

Patrón de fuerza electromotriz Latimer-Clark.—

La pila Latimer-Clark puede tomarse como patrón de fuerza electromotriz, porque da una *tensión constante* a la temperatura de 15°.

El recipiente para esta pila es un tubo de ensayo de 2 cm. de diámetro, por 6 ó 7 de longitud, cerrado en su boca por un tapón agujereado para dar paso a los terminales de sus polos (fig. 40).

El polo positivo es una capa de mercurio, purificado con esmero, que ocupa 1'5 cm. del fondo del tubo y que comunica con el exterior mediante un hilo de platino, protegido fuera del mercurio por un tubo fino de vidrio.

El polo negativo es una varilla de cinc. El elemento activo y despolarizante, es una pasta de sulfato de cinc y sulfato mercurioso, preparada en frío conteniendo 100 partes de agua, 50 de sulfato de cinc y 12 de sulfato mercurioso, todo ello en las mejores condiciones de pureza.

La fuerza electromotriz de este elemento a 15° C., es de 1'433 voltios y a temperaturas t , próximas a ésta, puede calcularse mediante la fórmula

$$1'433 - [1190(t - 15) + 7(t - 15)^2]10^{-6} \text{ voltios}$$

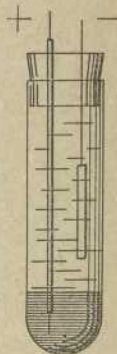


Fig. 40

Este elemento no es transportable, no puede emplearse hasta después de algunas semanas de montaje, y no debe funcionar nunca en circuito cerrado limitándose, por lo tanto, su empleo, a experiencias con condensadores y electrómetros, o métodos de compensación, en que el gasto de corriente es insignificante.

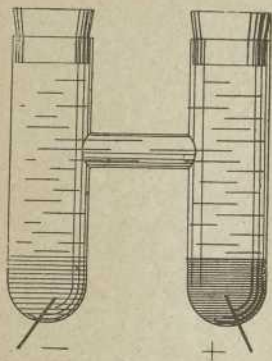


Fig. 41

Patrón Weston. — El recipiente para el elemento Weston, está formado por dos tubos como el empleado por Clark, unidos por un tercero en forma de *H* (figura 41), y tapadas sus bocas mediante tapones y barniz de laca, o soldadas a la lámpara.

Los electrodos son hilos de platino que atraviesan el fondo de los tubos. Uno de ellos, lleva una pequeña capa de mercurio y el otro de amalgama de cadmio, llenándose el resto del recipiente con una disolución saturada y cristales de sulfato de cadmio.

La fuerza electromotriz de este elemento es de 1'0186 a 20° C. y a temperaturas próximas a ésta puede calcularse mediante la fórmula

$$1'0186 - 4(t - 20)10^{-5} \text{ voltios}$$

El elemento tal como queda descrito, no es transportable, pero se construyen modelos convenientemente modificados, que lo son (fig. 42). Esta pila puede emplearse en seguida de haberla montado. Se recomienda, como para la Clark, que no funcione nunca en circuito cerrado sin resistencia.

Cuando las mediciones exigen corriente de alguna intensidad, deben tomarse como generadores, o el elemento Daniell de sulfato de cobre, o los acumuladores calibrados de antemano por comparación con un elemento patrón.

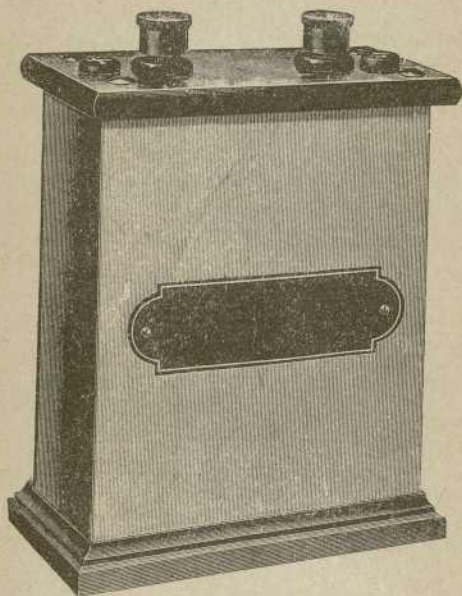


Fig. 42

Si se emplean acumuladores, debe tenerse en cuenta que su débil resistencia interior, puede dar lugar a corrientes peligrosas para los carretes de resistencias y galvanómetros.

Medida de potenciales.— La *medida absoluta* de un potencial, puede efectuarse mediante el elec-

trómetro absoluto, estudiado en electrostática (tomo I, pág. 79).

Generalmente, la medición de potenciales se efectúa por *procedimientos indirectos*, comparando el desconocido con otros conocidos que se toman como tipos.

Son indirectos, todos los procedimientos que vamos a estudiar a continuación.

Método del condensador. — Para comparar la fuerza electromotriz de dos pilas, se emplea con ventaja el método del condensador.

Un condensador de capacidad C , se carga sucesivamente con las dos pilas de fuerzas electromotrices E y E' . Las cantidades de electricidad acumuladas serán (tomo I, cap. V)

$$Q = CE \quad \text{y} \quad Q' = CE'$$

Después de cada carga, unamos las armaduras del condensador a través de un galvanómetro balístico, y llamando α_1 y α_2 a las desviaciones observadas, tendremos (cap. I)

$$Q = B \operatorname{sen} \frac{\alpha_1}{2} \qquad Q' = B \operatorname{sen} \frac{\alpha_2}{2}$$

y, por lo tanto

$$\frac{Q}{Q'} = \frac{\operatorname{sen} \frac{\alpha_1}{2}}{\operatorname{sen} \frac{\alpha_2}{2}} \qquad \text{o} \qquad \frac{E}{E'} = \frac{\operatorname{sen} \frac{\alpha_1}{2}}{\operatorname{sen} \frac{\alpha_2}{2}}$$

Electrómetro de cuadrante. — El aparato llamado *electrómetro de cuadrante* está representado esquemáticamente en la fig. 43, en proyección horizontal y vertical. Un cilindro de latón, tapado

por sus dos bases, está cortado por dos planos que pasan por el eje y son perpendiculares entre sí, dando lugar a los cuatro sectores B, C, D, E , y en sección B', D' .

Dentro del espacio limitado por los cuatro sectores, se mueve otra pieza metálica A, A' , llamada aguja, suspendida de una hebra de seda y pudiendo recibir comunicación eléctrica mediante su eje mismo, que se prolonga por debajo hasta sumergirse en un recipiente Q . Para observar el giro de la aguja, lleva en su eje un espejo P .

Todas las piezas metálicas del aparato, sectores y aguja, tienen bastante superficie para presentar una capacidad eléctrica apreciable.

Los cuadrantes opuestos están en comunicación eléctrica mediante conductores, que se ven en la figura.

La aguja A y cada una de las partes de cuadrantes DB o CE forman un condensador, cuyo dieléctrico es el aire; y si electrizamos con un signo cualquiera la aguja, con igual signo un par de cuadrantes, y con signo contrario el otro par, la aguja quedará sometida a una atracción y a una repulsión que sumarán sus efectos para obligarla a girar en un sentido determinado buscando una posición de equilibrio.

Llamando V, V_1 y V_2 a los potenciales de la aguja y de cada uno de los pares de cuadrantes,

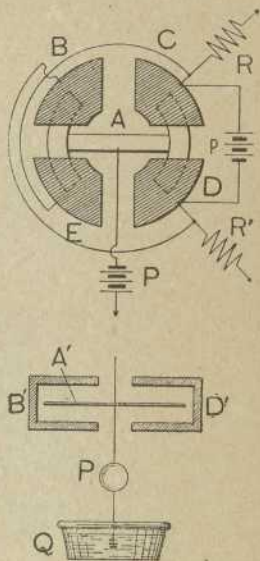


Fig. 43

puede calcularse el ángulo Θ de giro del sistema movable, mediante la fórmula

$$(\Theta) = a(2V - V_1 - V_2)(V_2 - V_1), \quad [1]$$

en la cual a es una constante propia de cada aparato.

En la figura 44 se ve el electrómetro de cuadrante

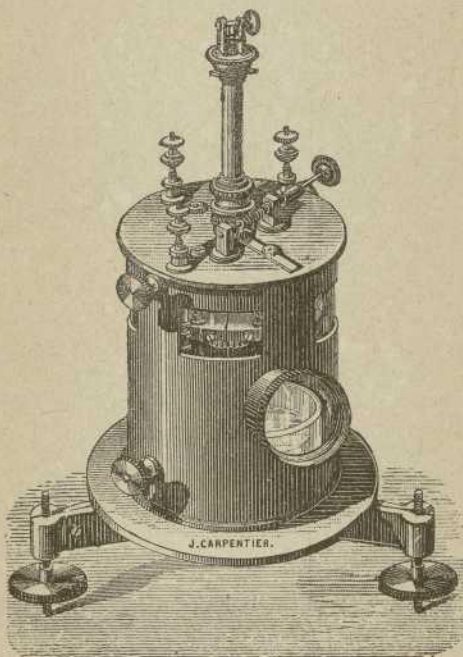


Fig. 44

tipo Mascart, construido con arreglo a la teoría anterior.

En el interior del cilindro, que constituye el

aparato, están los sectores metálicos, la aguja móvil y el depósito mediante el cual se da comunicación a la aguja.

Para observar los movimientos del espejito, hay una ventana de mira que se ve en la parte anterior.

Electrómetro aperiódico Carpentier.—El fundamento de este aparato, es el mismo que el de

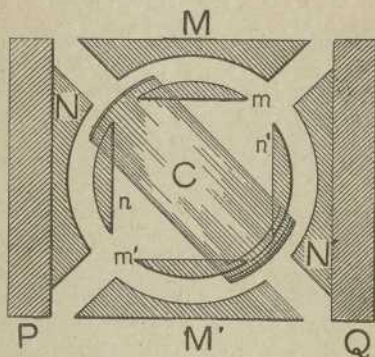


Fig. 45

Mascart, y su aspecto exterior es el del galvanómetro Deprez D'Arsonval.

Las armaduras fijas, son porciones de dos superficies cilíndricas concéntricas, $MM' mm'$ y $NN' nn'$ (fig. 45), y la armadura móvil es un cuadro C de lámina de aluminio, completamente cerrado, teniendo dos de sus costados planos y los otros dos cilíndricos para moverse entre las armaduras fijas.

El funcionamiento como electrómetro, es completamente igual al de Mascart, pero para conseguir la aperiodicidad, se colocan todas las piezas metálicas descritas, entre los polos de un imán

permanente PQ . De este modo, al moverse la armadura móvil en el campo magnético del imán permanente, nacen en ella corrientes de Foucault, que encuentran perfecto circuito para desarrollarse,

y obedeciendo a la ley de Lenz, detienen el giro de la armadura.

La figura 46 representa el aparato en conjunto. Sus tres bornes de empalme corresponden a las piezas metálicas Mm , Nn y C , para operar con ellas del mismo modo que con el de Mascart.

El aparato es más industrial que el de Mascart, aunque menos sensible.

La sensibilidad se regula cambiando el hilo de suspensión de la armadura móvil.

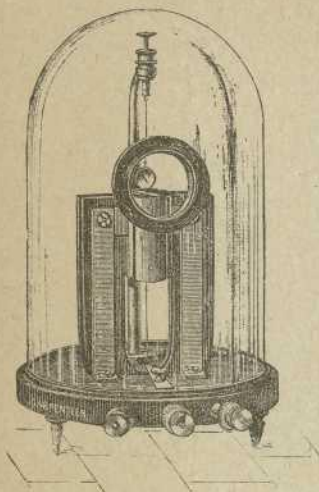


Fig. 46.
Electrómetro aperiódico
Carpentier

siempre por comparación, operando del modo siguiente: Se unen los pares de cuadrantes opuestos a los polos de una pila p (fig. 43), y a dos resistencias que comunican con tierra. El cuadro móvil comunica con un generador P , que le da un potencial V perfectamente conocido.

Sea v la tensión que produce la pila p , y los potenciales en los pares de sectores, serán

$$V_2 = \frac{v}{2}$$

$$V_1 = -\frac{v}{2}$$

por lo tanto

$$V_2 - V_1 = v \qquad V_2 + V_1 = 0$$

con lo cual, la fórmula general [I]

$$\theta = a[2V - (V_1 + V_2)](V_2 - V_1)$$

se reduce a

$$\theta = a \times 2V \times v$$

Repetamos el experimento substituyendo el generador P , por el punto del generador o conductor cuyo potencial V' queremos medir.

El ángulo de giro, será ahora

$$\theta' = a \times 2V' \times v$$

luego, entre esta fórmula y la anterior tendremos

$$\frac{\theta}{\theta'} = \frac{V}{V'} \qquad \text{o} \qquad V' = \frac{\theta'}{\theta} V$$

Medida de la diferencia de tensión entre dos puntos.— Adoptemos la misma disposición que en el caso anterior, pero procurando dar a la pieza movable un potencial superior al v de la pila ϕ , y a la diferencia $V_2 - V_1$ que vamos a medir.

En el primer experimento tendremos como antes

$$\theta = a \times 2V \times v$$

Substituyamos la pila ϕ , por los dos puntos cuya diferencia de tensión buscamos. Esta tensión es despreciable comparada con la V de la pieza movable, y la fórmula general nos dará ahora

$$\theta' = a \times 2V \times (V_2 - V_1)$$

luego

$$\frac{\theta}{\theta'} = \frac{v}{V_2 - V_1} \qquad \text{o} \qquad V_2 - V_1 = \frac{\theta'}{\theta} v$$

Medida de una diferencia de potencial alterna.— Unamos un polo de la pila p , a un par de cuadrantes y a la pieza movable, y el otro polo al otro par de cuadrantes.

Tendremos, según lo dicho,

$$V = V_2 = \frac{v}{2} \quad V_1 = -\frac{v}{2} \quad \theta = av^2$$

Substituyamos la pila p por los dos puntos cuya diferencia de tensión $V_2 - V_1$ queremos estudiar y como ahora $V = V_2$ la misma fórmula general nos dará

$$\theta' = a(V_2 - V_1)^2 \quad [2]$$

luego

$$\frac{\theta}{\theta'} = \frac{v^2}{(V_2 - V_1)^2} \quad \text{o} \quad V_2 - V_1 = v \sqrt{\frac{\theta'}{\theta}}$$

Es claro que $V_2 - V_1$ representará la diferencia de tensión eficaz entre los puntos dados.

Método idiostático.— Para medir la diferencia de tensión entre dos puntos A y B , sin el auxilio de generador, se unen el cuadro y uno de los pares de segmentos fijos, al punto A y el otro par al punto B ; exactamente lo mismo que en el caso anterior. Por lo tanto, la fórmula [2] nos dará en valor absoluto

$$\theta = a(V_2 - V_1)^2 \quad \text{o} \quad V_2 - V_1 = \sqrt{\frac{\theta}{a}}$$

Para aplicar esta fórmula, precisa conocer la constante a del aparato, la cual puede ser determinada por un experimento preliminar, midiendo una diferencia de potencial conocida.

Método de Poggendorf. — Una pila tipo P (figura 47) y la p , cuyo potencial se quiere medir, se montan en oposición uniendo los puntos comunes a sus dos polos, mediante una resistencia r . En el circuito de la pila mayor P , hay una resistencia ρ y en el de la pila menor, un galvanómetro G .

Tanteando las resistencias r y ρ , se llega a conseguir que G no acuse corriente. Aplicando entonces

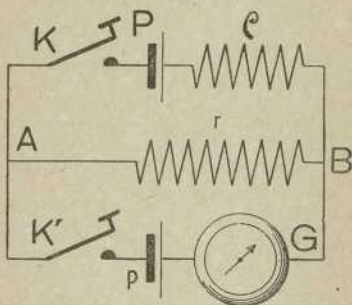


Fig. 47

la segunda ley de Kirchhoff (tomo I, pág. 105), a los dos polígonos cerrados que forman la figura y teniendo en cuenta que el inferior sólo tiene corriente en el lado r , tendremos

$$E = I(r + \rho + P)$$

$$e = Ir$$

de donde, dividiendo una por otra, se tiene

$$\frac{E}{e} = \frac{r + \rho + P}{r} \quad [3]$$

Fórmula independiente de P. — La fórmula [3], hallada en el método de Poggendorf, depende de la resistencia interior de la pila tipo, cuyo dato es difícil de conocer y sumamente variable. Para

evitar este inconveniente, se equilibran nuevamente los circuitos con otros valores de ρ y de r . Sean éstos ρ' y r' y tendremos

$$\frac{E}{e} = \frac{r' + \rho' + P}{r'}$$

y de las dos ecuaciones de equilibrio se deduce

$$\frac{E}{e} = \frac{r + \rho + P}{r} = \frac{r' + \rho' + P}{r'} = \frac{r + \rho - r' - \rho'}{r - r'}$$

o bien

$$\frac{E}{e} = 1 + \frac{\rho - \rho'}{r - r'}$$

que es independiente de P .

Potenciómetros.— La fórmula [3] hallada en el método de Poggendorf, tiene como numerador de su segundo miembro, la resistencia total del circuito en que circula la corriente del generador tipo. Llamando R a esta resistencia, se puede escribir

$$\frac{E}{e} = \frac{R}{r} \quad [4]$$

y esta fórmula sirve de fundamento a los potenciómetros.

En todos los potenciómetros, se tiene un circuito $ABRP$ de resistencia invariable R (fig. 48), alimentado por una fuerza electromotriz E .

Se forma un segundo circuito, con una fuerza electromotriz e y un galvanómetro G , y se deriva del circuito principal, tomando de él una parte $r = AC$ escogida con la condición de inmovilizar el galvanómetro, exactamente del mismo modo que en el método de Poggendorf, y tendremos como allí la relación [4].

Se forma luego otro tercer circuito, de fuerza

electromotriz e' en una parte $r' = AC'$ del circuito, para que se cumpla la condición

$$\frac{E}{e'} = \frac{R}{r'} \quad [5]$$

dividiendo miembro a miembro las proporciones [4] y [5] se encuentra

$$\frac{e}{e'} = \frac{r}{r'}$$

El equilibrio de los galvanómetros debe hacerse sucesivamente, de manera que pueda emplearse

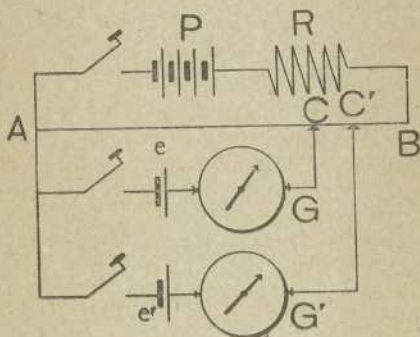


Fig. 48

uno solo convenientemente conmutado, para unirlo a los circuitos que se comparan.

La disposición de la resistencia r , es muy variada de unos a otros modelos de potenciómetros y casi es esta disposición lo que los caracteriza principalmente.

Cuando la pila tipo empleada se polarice fácilmente, será muy conveniente no fatigarla mucho con los tanteos de equilibrio. Para ello, se pone

en serie con el galvanómetro una gran resistencia y a través de ella se emite la corriente en los primeros tanteos. Cuando el equilibrio se ha conseguido, se afina y se comprueba suprimiendo la resistencia.

La exactitud de las medidas depende de la exactitud con que pueda medirse la resistencia r y de la sensibilidad del galvanómetro empleado.

Para medir grandes tensiones, se hará obrar esta tensión sobre una resistencia apropiada, y con el potenciómetro, se medirá la diferencia que se establece entre los extremos de una parte alícuota, bien definida, de aquella resistencia.

Estas resistencias auxiliares se llaman *reductores de tensión*.

Potenciómetro de Clark. — Para facilitar el empleo de la fórmula

$$\frac{e}{e'} = \frac{r}{r'}$$

se disponen los potenciómetros de manera que pueda tomarse una resistencia r , numéricamente igual a la fuerza electromotriz e del generador tipo, empleado, es decir, que si e representa n voltios, r sea n unidades de resistencia. Pero puede tomarse cualquier magnitud para unidad de resistencia, con tal que se midan con la misma unidad los dos términos de la relación $r : r'$.

Con este convenio, la fórmula fundamental de los potenciómetros será

$$\frac{n}{e'} = \frac{n}{r'} \quad \text{o} \quad e' = r'$$

resultando así, aparatos de lectura directa.

Generalmente se emplean para estas mediciones los elementos Latimer-Clark o Weston, cuyas fuerzas electromotrices son próximamente 1'434

y 1'019; por eso se escoge el valor de r de manera que sea 1'5 de la unidad arbitraria fijada.

En el potenciómetro de Clark, modificado por Cromton, que se representa esquemáticamente en la figura 49, la resistencia r está formada por un hilo largo CN , tendido paralelamente a una regla graduada, y 14 carretes 1, 2, 3... 13, 14, de la misma resistencia que el hilo. La unidad de resistencia

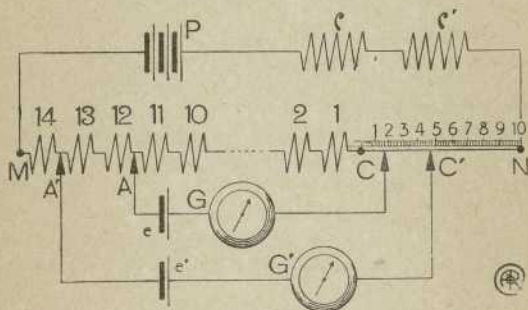


Fig. 49

estará formada por 10 carretes, de manera que con los 14 y el hilo, tendremos 1'5 unidades.

La regla paralela al hilo, está dividida en 1000 partes y como el hilo es 0'1 de la unidad de resistencia, podremos expresar r con aproximación de $0'1 \times 0'001 = 0'0001$.

El potenciómetro lleva también unas resistencias ρ y ρ' , llamadas *reguladoras*, que suelen ser, la una de bloques y la otra continua, constituida por un hilo sobre el cual resbala un frotador.

He aquí la manera de operar:

Se toma un generador auxiliar P cuya fuerza electromotriz oscile entre 1'5 y 2 voltios. Se toma un elemento tipo, un Weston, por ejemplo, cuya fuerza electromotriz es $e = 1'019$ y poniendo los

cursores A y C de manera que señalen la resistencia $1'019$, se actúa sobre las resistencias ρ y ρ' hasta conseguir el equilibrio del galvanómetro. Entonces puede decirse que el potenciómetro está *calibrado*.

Para medir la tensión de un generador e' cualquiera, basta unirlo a los cursores y mover éstos hasta conseguir una posición $A'C'$ para la cual esté equilibrado el galvanómetro G' .

El número correspondiente a la posición de los cursores, será la tensión del generador e' .

De otra manera puede procederse.

Se arreglan las resistencias ρ y ρ' para que el generador auxiliar P produzca una diferencia de tensión de $1'5$ voltios entre los puntos M y N . De este modo, una división del hilo corresponderá a $0'0001$ de voltio. Para medir la tensión de un generador cualquiera e , bastará unirlo a los cursores y buscar la posición A, C , que corresponde al equilibrio del galvanómetro. El número marcado por los cursores será la tensión e .

Potenciómetro Carpentier. — La figura 50 representa esquemáticamente, la disposición adoptada por la casa Carpentier para sus potenciómetros.

Las resistencias ρ y ρ' son las *reguladoras* para la tensión del generador auxiliar P y se componen de cuatro décadas dispuestas en dos círculos, que llegan a sumar 10000 ohmios.

Las resistencias variables del circuito potenciométrico, se componen de cuatro series de carretes. A, B, b, C, c , cuyos valores son:

Serie	Carretes	de	ohmios
AA'	dos	10000	—
$BB'B''$	once	1000	—
b	un	1100	—
$b'b''$	nueve	100	—
$CC'C''$	once	10	—
c	un	11	—
$c'c''$	nueve	1	—

Para combinar estas resistencias, se emplean unos conmutadores especiales (fig. 51), compuestos

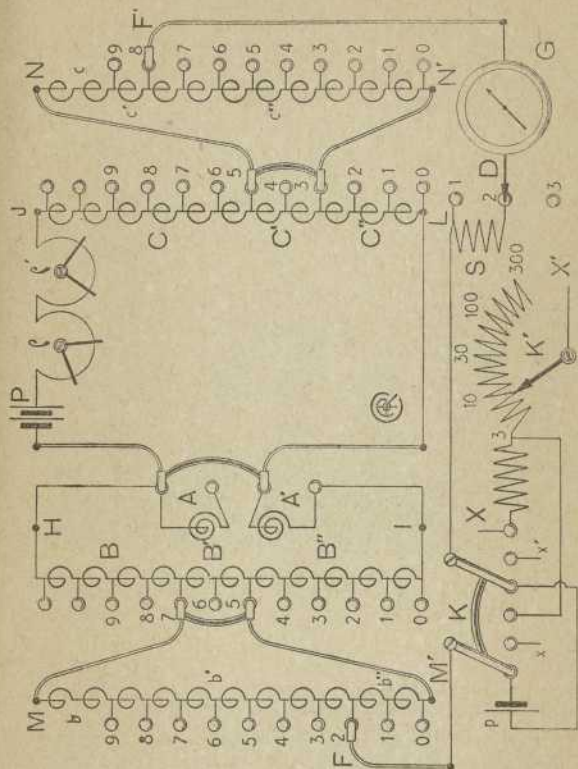


Fig. 50

de bloques dispuestos sobre un cuadrante de cilindro 1, 2, 3... y frotadores f' movidos por la palanca mO . Al exterior del aparato (fig. 52), salen so-

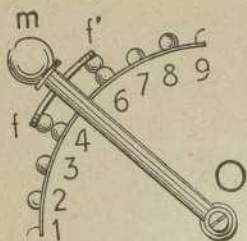


Fig. 51

lamente los mangos de las palancas, correspondientes a los combinadores de las series resistentes.

Los conmutadores *b* y *c*, tienen un solo frotador. Los *A*, *B*, *C*, tienen dos frotadores, siempre separados por la distancia correspondiente a dos bloques de contacto.

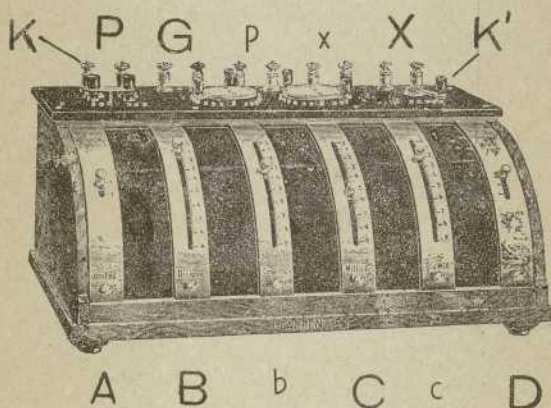


Fig. 52

Resistencias compuestas. — Para estudiar las resistencias combinadas del potenciómetro, consideremos la figura 53, más esquemática aún que la 50, en la cual se han suprimido todos los detalles del circuito galvanométrico.

Recordemos que $b + b' + b''$ son siempre diez carretes con una resistencia total de $1100 + 9 \times 100 = 2000$ ohmios; B' , son los dos carretes com-

prendidos por el doble frotador y valen 2000 ohmios; $B + B''$, son siempre nueve carretes con una resistencia de $9 \times 1000 = 9000$ ohmios.

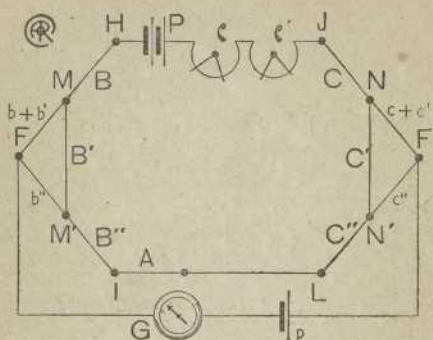


Fig. 53

La resistencia compuesta entre los puntos H, I , será

$$B + \frac{B'(b + b' + b'')}{B' + b + b' + b''} + B''$$

$$= 9000 + \frac{2000(2000)}{4000} = 10000$$

Del mismo modo estudiaríamos la resistencia compuesta entre los puntos J, L , que vale 100 ohmios.

La resistencia A es siempre de 10000 ohmios y el juego de su conmutador hace que esté intercalada entre P y H , o entre I y L .

De todas maneras, el circuito potenciométrico completo representado en la figura, tendrá siempre una resistencia

Entre H e I	10000	ohmios
A	10000	—
Entre L y J	100	—
Total.....	$R =$	20100 —

Resistencia parcial.—El circuito galvanométrico está derivado entre los frotadores F y F' , comprendiendo una fracción de la resistencia total, expresada por

$$r = b'' + B'' + A + C'' + c''$$

Recordando los valores de los carretes componentes de estas series, se ve fácilmente que la suma anterior tendrá sus decenas de millar expresadas por A ; sus millares, por B'' ; sus centenas, por b'' ; sus decenas, por C'' y sus unidades, por c'' .

En la figura 53, hemos puesto las resistencias A, B, b, C, c , de la manera más conveniente para la claridad del dibujo; pero en el aparato (fig. 52), estas resistencias están puestas en orden de sus magnitudes y se lee la resistencia comprendida entre los frotadores, sin más que leer las cifras correspondientes a las posiciones de sus palancas.

Circuito galvanométrico.—En el circuito del galvanómetro G (fig. 50), existe un conmutador ordinario de doble palanca K , cuyo objeto es intercalar el elemento tipo ϕ , o los dos puntos x , entre los cuales se quiere medir una diferencia de potencial, cuando ésta es menor de 2 voltios.

Cuando la diferencia de potencial es mayor de dos voltios, se empalma en los bornes X, X' , y mediante un reóstato K' , *reductor de tensión* de 30000 ohmios, se lleva al circuito galvanométrico sólo una fracción determinada de la tensión total,

$$\frac{1}{3}, \frac{1}{10}, \frac{1}{30}, \frac{1}{100}, \text{ o } \frac{1}{300}$$

y el resultado obtenido de la medición, deberá multiplicarse por 3, 10, 30, 100 ó 300. Por eso al conmutador K' se le llama *multiplicador*.

El otro conmutador D , que se ve en la figura 50 y en la 52, tiene por objeto: cortar el circuito del

galvanómetro, cuando el frotador ocupa la posición 3; cerrar el circuito del galvanómetro a través de la resistencia protectora S , de 10000 ohmios, durante los primeros tanteos de equilibrio (posición 2); suprimir esta resistencia en los últimos tanteos (posición 1).

Regulación del aparato. — Para que el potenciómetro sea un aparato de lectura directa, es preciso que el generador auxiliar P (fig. 53), produzca una diferencia de potencial entre los puntos H y J , de 2'01 voltios.

Para conseguir esta tensión, se empalma en p un elemento tipo, por ejemplo, de Clark con su fuerza electromotriz de 1'434 voltios. Se colocan las palancas de los conmutadores de manera que señalen una resistencia $r = 1434$ ohmios, y se actúa entonces sobre los reóstatos ρ y ρ' hasta conseguir el equilibrio del galvanómetro.

Aplicando la fórmula de Poggendorf a estos números tendremos

$$\frac{E}{1'434} = \frac{20100}{1434} \quad \text{o} \quad E = 2'01$$

como se quería.

Manera de operar. — Una vez regulado el aparato, se actúa sobre el conmutador K para quitar del circuito galvanométrico el elemento tipo p y poner en su lugar los puntos x si se trata de una diferencia de potencial menor que 2 voltios, o los puntos X si es mayor que 2 voltios. En este último caso, actuaremos también sobre el multiplicador K' , para que la tensión que midamos sea siempre menor que 2 voltios.

Actuaremos luego sobre los conmutadores A , B , b , C , c , hasta conseguir nuevamente el equilibrio del galvanómetro y cuando lo consigamos,

tendremos, siempre según la fórmula de Poggen-dorf

$$\frac{2'01}{x} = \frac{20100}{r} \quad \text{o} \quad x = \frac{r}{10000}$$

de manera que *la tensión buscada vendrá expresada por las cifras señaladas con las posiciones de los conmutadores, pero tomando A como unidades, B como décimas, etc.*

Si hubiera necesidad de emplear el multiplicador, la medida leída debería multiplicarse por el número correspondiente a la posición de la palanca K.'

El menor número que pueden marcar las palancas de los conmutadores es el 0'0001 y esta será la menor tensión que puede medirse con el potenciómetro; el mayor número que pueden marcar, es el 2, que con el multiplicador en la posición 300, nos permitirá medir una tensión de 600 voltios como máxima.

Voltímetros.— En las instalaciones industriales, se mide la diferencia de potencial entre dos puntos, derivando entre ellos un galvanómetro o electrodinamómetro *de gran resistencia*. Esta condición es necesaria, para que la derivación no altere la diferencia de potencial existente entre los puntos que deben examinarse.

Las indicaciones del aparato obedecerán a la fórmula

$$I = \frac{V}{g}$$

y siendo g constante, resultarán proporcionales a la diferencia de potencial V . Pueden graduarse estos aparatos desde luego en voltios y reciben el nombre de *voltímetros*.

Como se ve, *el voltímetro y el amperímetro tienen igual funcionamiento y pueden tener igual fundamento y aspecto*. La diferencia única existente es

la resistencia interior del aparato, *grande en el voltímetro y pequeña en el amperímetro*, por lo cual, se monta siempre en derivación el primero y en serie el segundo.

Todas las condiciones generales señaladas en el capítulo anterior, al tratar de los amperímetros se aplicarán igualmente a los voltímetros.

El aspecto exterior de los voltímetros puede ser

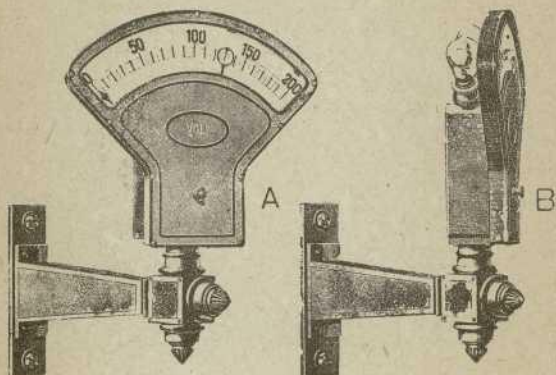


Fig. 54

igual que el de los amperímetros representados en la figura 24.

La figura 54 representa un voltímetro especial, de gran tamaño, construido por la casa Siemens Halske, propio para centrales que suministren la energía a tensión constante. El voltímetro está sostenido por un brazo, que se monta en la parte más elevada del cuadro para que se destaque de los demás aparatos. Todo el cuerpo del voltímetro puede girar sobre un eje vertical, lo que permite orientarlo de manera que sea visible de todos los puntos de la sala de máquinas. El limbo es

transparente y graduado con trazos fuertes, estando iluminado posteriormente por lámparas eléctricas; resultando así legible a distancia. Para que se destaque de lejos, el punto de la escala correspondiente a la tensión de servicio, lleva el aparato

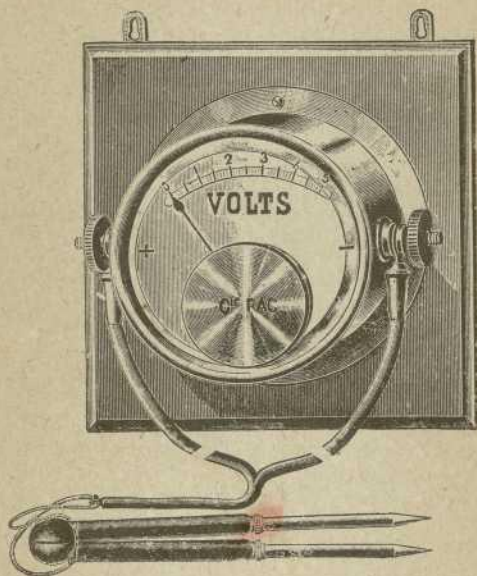


Fig. 55

un segundo índice que puede moverse a mano, por medio de un botón *B*, hasta señalar la tensión de servicio. En la figura está señalado 130 voltios.

La figura 55, representa un voltímetro especial para la localización de averías. Los bornes del aparato están unidos, mediante un cordón flexible, a las puntas de un compás provisto de ramas aisladas. Las puntas del compás son finísimas y pueden

atravesar fácilmente la cubierta aisladora de los hilos de una instalación interior, para ir buscando el sitio de interrupción.

Dada la gran semejanza entre amperímetros y voltímetros, en los tipos corrientes, estudiaremos aquí solamente los voltímetros electrostáticos, deducidos del electrómetro de cuadrantes y no de los amperímetros.

Voltímetros electrostáticos de Lord Kelvin. — La figura 56 representa el modelo construido por Lord

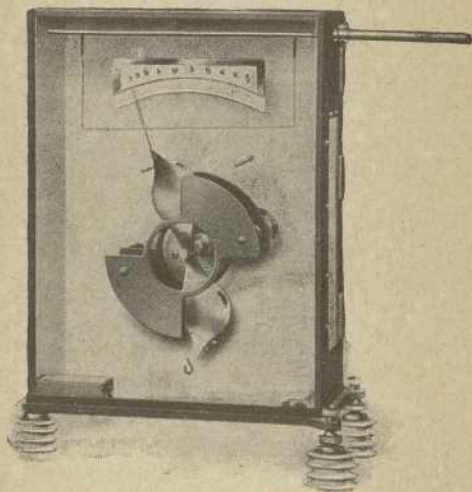


Fig. 56

Kelvin, para la medición de altas diferencias de potencial producidas por alternadores y transformadores.

Los sectores metálicos del electrómetro de cua-

drantes se han reducido aquí a dos opuestos y la aguja, en forma de 8, se mueve sobre un eje horizontal y arrastra en su giro al índice del aparato. El sistema movable se mantiene en el cero de la graduación mediante un muelle metálico en espiral.

Los dos puntos cuya diferencia de potencial queremos conocer, se unen al par de cuadrantes y a la aguja movable de manera que la acción atractiva de las dos partes metálicas electrizadas, determinará un giro cuyo ángulo será proporcional al cuadrado de la diferencia de potencial

$$\theta = a(V_2 - V_1)^2 \quad \text{o} \quad V_2 - V_1 = \sqrt{\frac{\theta}{a}}$$

fórmula completamente igual a la del método idiostático en el electrómetro de cuadrantes.

La hoja inferior de la aguja movable lleva un apéndice, en el cual se suspenden pesos que dificulten sus movimientos con objeto de variar su sensibilidad. Con el peso más pequeño, cada división de la escala corresponde a 50 voltios; con el peso medio, a 100 voltios, y con el grande, a 200 voltios.

Este voltímetro no es aperiódico y se amortiguan sus oscilaciones, frenando la hoja superior de la aguja, mediante una varilla horizontal, que se ve en la figura, accionada por la palanca que sale fuera de la caja por la parte superior derecha de la figura.

Balanza electrostática de Lord Kelvin. — La balanza electrostática es un voltímetro deducido del electrómetro absoluto estudiado en el tomo I, página 79.

Los dos puntos entre los cuales se quiere medir la diferencia de potencial, se ponen en comunicación con dos platillos metálicos *P* y *V* (fig. 57), fijo el inferior y movable el superior. Este último actúa sobre una palanca y mueve la aguja indicadora del aparato.

Con la balanza electrostática, se aprecian fácilmente los 100000 voltios de tensión continua o los 50000 de tensión alterna y es claro que para estas tensiones deben tomarse precauciones especiales de aislamiento, distancias explosivas, y

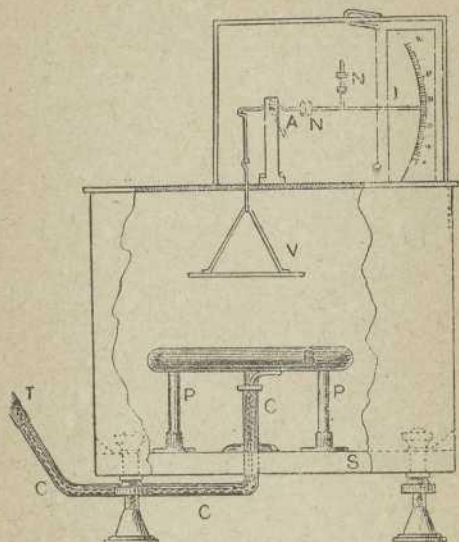


Fig. 57

hasta efectos de descargas lentas por puntas y aristas vivas. Para esto último, se redondean todas las aristas y extremidades de las piezas metálicas que contiene el aparato.

El efecto de atracción entre los dos platillos, vendrá dado por la fórmula conocida (tomo I, página 81).

$$p = \frac{V^2 s}{x^2 8\pi}$$

Voltímetro electrostático Abraham - Villard. —

El fundamento de este aparato es el mismo que el de Kelvin y derivado como aquél del electrómetro absoluto. Permite medir tensiones hasta 200000 voltios, en forma continua o alterna y con cualquier frecuencia.

Sometiéndose el aparato a tales tensiones es forzoso evitar toda punta metálica, y aun toda arista viva. En la figura 58 se ve su aspecto en conjunto.

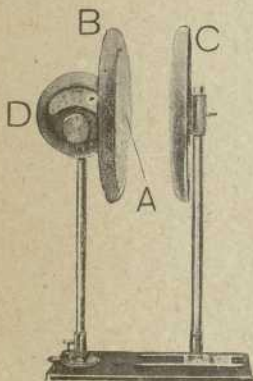


Fig. 58.

Voltímetro electrostático
Abraham-Villard

A, es una superficie metálica en forma de casquete esférico, que comunica con uno de los polos del generador de tensión. Para que el campo eléctrico que se forma en el aparato se conserve uniforme en toda la extensión de la pieza A, se rodea ésta de otra superficie metálica B, que obra de anillo de guarda (tomo I, página 79).

El segundo polo del generador de tensión, comunica con el platillo C.

El efecto de presión electrostática entre A y C determina un ligero movimiento de la pieza A, y este movimiento se amplía grandemente con un sencillo mecanismo encerrado en la caja D, que determina las desviaciones de la aguja indicadora.

Las piezas metálicas descritas, están sostenidas por dos largas columnas de vidrio o porcelana. La de la izquierda fija, y la de la derecha movable a lo largo de una ranura, fijándose su posición mediante un tornillo de presión.

La menor o mayor separación de las piezas A y C,

determina una sensibilidad mayor o menor del aparato.

En cada posición de la corredera, se fija la constante por que debe multiplicarse la indicación de la aguja, para tener la tensión medida.

El modelo representado en la figura se construye en la casa Carpentier, con el nombre de gran modelo, con sensibilidad variable entre 6000 y 40000 voltios.

Voltímetro electrostático Carpentier. — Este aparato tiene el mismo fundamento que el electró-

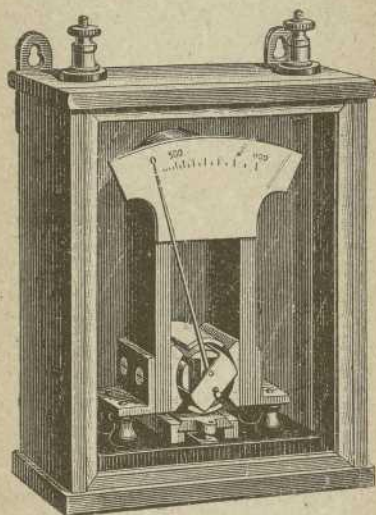


Fig. 59. — Voltímetro electrostático Carpentier

metro aperiódico del mismo constructor, estudiado en este capítulo.

En la figura 59 se ven perfectamente los sectores

cilíndricos que forman las armaduras fijas, y el cuadro movable de aluminio que constituye la armadura movable. Esta última lleva la aguja indicadora del aparato.

Envolviendo las armaduras metálicas, se ven las dos ramas de un imán permanente, que induce corrientes de Foucault sobre el cuadro de aluminio y hace aperiódicos sus movimientos.

Las armaduras fijas y movibles son las que han de comunicar con los puntos entre los cuales se mide la tensión, por lo cual, unas u otras están completamente aisladas eléctricamente de las demás piezas metálicas del aparato y montadas en un soporte que permite moverlas horizontalmente para graduar la influencia del imán permanente.

Con este aparato se miden fácilmente hasta 5000 voltios.

Electrización de los vidrios. — Los voltímetros electrostáticos, suelen ir encerrados en cajas metálicas que tienen una de sus paredes de vidrio, para ver la aguja indicadora y la graduación sobre la cual se mueve.

Como estos aparatos se someten siempre a elevadas tensiones, es frecuente que los vidrios se electricen y atraigan los índices dificultando las indicaciones del aparato.

Este efecto es debido a la mala conductibilidad del vidrio y, por lo tanto, se evitará, dándole alguna conductibilidad para que su carga electrostática, si se presenta, vaya a tierra a través de la caja metálica.

Se aconseja, cruzar las caras del vidrio con algunas líneas doradas formando cuadrícula, que lleguen hasta los bordes por donde el vidrio se sujeta a la caja metálica.

Puede también recubrirse el vidrio con una capa de gelatina y ácido sulfúrico, barnizando luego con un barniz transparente.

Puede, en fin, humedecerse el vidrio con el aliento, en el momento de operar.

El vidrio de los voltímetros electrostáticos, no

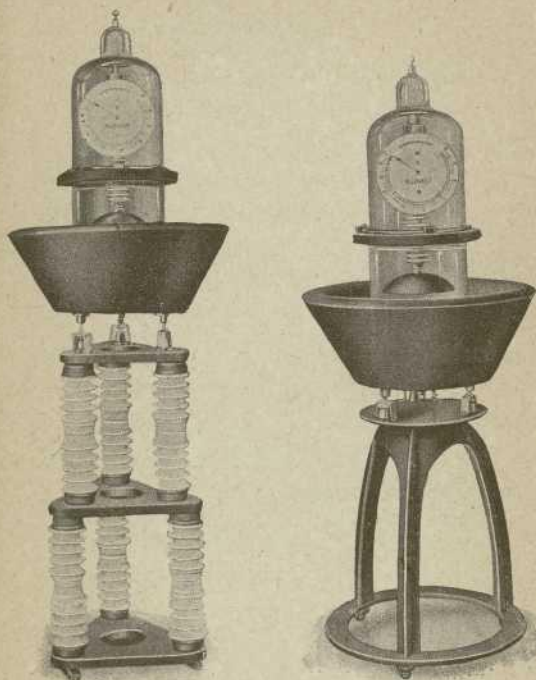


Fig. 60

debe frotarse nunca, cuando se vaya a medir. Esto podría iniciar la electrización que tratamos de evitar.

El uso de estos aparatos, exige grandes precau-

ciones, respecto a contactos y aislamientos, teniendo en cuenta las altas tensiones que se miden con ellos.

La figura 60 representa dos tipos de voltímetros electrostáticos de alta tensión, *kilovoltímetros*, contruídos por la casa Siemens.

Reductores. — Los reductores empleados para disminuir la sensibilidad de los voltímetros, análogos a los shunts de los amperímetros, son *resistencias calculadas convenientemente y montadas en serie con el voltímetro, para que consuman una fracción perfectamente determinada de la tensión total.*

Cuando se trate de corrientes constantes, el reductor podrá ser una resistencia cualquiera; pero con corrientes variables, como son las alternas, el reductor deberá estar absolutamente desprovisto de autoinducción. En otro caso, las indicaciones del aparato se modifican con la impedancia del circuito, y ésta varía con la frecuencia de la corriente medida.

Cálculo de un reductor. — Si al voltímetro de resistencia g , ha de llegar solamente la $M^{\text{ésima}}$ parte de la tensión, consumiéndose las otras $M - 1$ partes en el reductor R , es preciso que

$$R = (M - 1)g \quad [6]$$

Al número M se le llama *poder multiplicador de tensión* del reductor, para distinguirlo del *poder multiplicador de corriente*, del shunt correspondiente a un amperímetro.

EJEMPLO. *Se tiene un voltímetro, que alcanza su desviación total cuando se somete a 150 voltios, gastando entonces 0'15 amperios. Se desea dotarlo de un reductor para poder medir hasta 600 voltios.*

La resistencia g , del voltímetro, según la ley de Ohm, es

$$g = \frac{V}{I} = \frac{150}{0.15} = 1000 \text{ ohmios}$$

El poder multiplicador del reductor debe ser

$$M = \frac{600}{150} = 4$$

Y la resistencia R del reductor, según la fórmula [6], será

$$R = (4 - 1)1000 = 3000 \text{ ohmios}$$

Cuando la resistencia del reductor no es muy grande, se coloca el reductor en la parte posterior

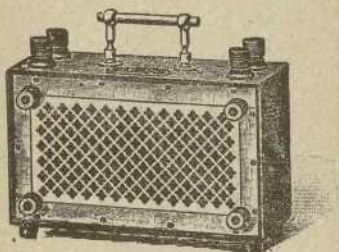


Fig. 61

del mismo voltímetro; pero cuando por su gran resistencia debe ocupar mucho sitio, se instala en el interior de una caja como la de la figura 61, provista de paredes taladradas para facilitar el enfriamiento del reductor.

Transformadores de tensión. — Cuando se trata de corrientes alternativas, pueden reducirse las indicaciones del voltímetro haciéndole actuar por

transformación. Para ello, se deriva entre los dos puntos cuya diferencia de tensión quiere medirse, el inductor de un pequeño transformador, cuyo inducido cierra su circuito sobre el voltímetro. Los números de vueltas del primario N_1 y del secundario N_2 , deben estar en la relación de las tensiones

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

y si V_2 es M veces menor que V_1 las razones anteriores serán iguales a M

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = M$$

y el poder multiplicador será la relación entre los números de vueltas.



Fig. 62

Estos transformadores se llaman *transformadores de tensión* y se disponen en baño de aceite, aislante y rígido, dejando al exterior únicamente los bornes de empalme. La figura 62 representa tres tipos distintos de estos aparatos, construídos por la casa Siemens Halske.

El primero es monofásico y los otros dos son trifásicos, para poder medir la tensión de los tres puentes.

Influencia de la frecuencia. — Hemos dicho que los amperímetros y voltímetros *son esencialmente iguales en su constitución*, y sus indicaciones obedecen a las variaciones de la intensidad que los atraviesa.

En el caso de corrientes alternas, la intensidad eficaz es, como sabemos (tomo II, cap. III).

$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + a^2 \Omega^2}}$$

Los amperímetros tienen pocas vueltas de hilo en sus cuadros multiplicadores y, por lo tanto, muy poca autoinducción. Si Ω es despreciable, podremos tomar como valor de la intensidad eficaz

$$I = \frac{V}{R}$$

y las indicaciones del amperímetro serán independientes de la frecuencia.

Por el contrario; en los voltímetros, la autoinducción es grande y sus indicaciones dependerán del término $a^2 \Omega^2$ y, como consecuencia, de la frecuencia, puesto que $a = 2\pi f$ (tomo II, pág. 25).

Todo esto nos indica que los voltímetros deben graduarse con la misma frecuencia a que han de funcionar.

Rectificación y graduación de voltímetros. — Como aparatos galvanométricos que contienen imanes, los voltímetros están expuestos a desarreglos, por variaciones de imantación con el tiempo, y por lo tanto, será conveniente verificar periódicamente sus indicaciones.

Para rectificar un aparato, puede recurrirse a la comparación con otro, de cuyo funcionamiento estemos seguros; o bien, puede emplearse un pro-

cedimiento análogo al expuesto en el capítulo anterior para la rectificación o graduación de los amperímetros.

Como allí, calibraremos un galvanómetro *G* (figura 39), para que la imagen reflejada por su espejo, recorra cierto número de divisiones por cada voltio que se aplique entre los puntos *A* y *B*.

Formemos un circuito con un generador cualquiera y una resistencia variable, que determine variaciones en el potencial disponible en los terminales de este circuito. Midamos este potencial sucesivamente, con el voltímetro de que se trata y con los puntos *A* y *B* de la figura 39 y tendremos comprobada la exactitud o error de las indicaciones del voltímetro y, en consecuencia, podremos rectificar o graduar el aparato.

CAPÍTULO IV

MEDIDA DE RESISTENCIA

Patrones de resistencia.— El patrón prototipo del ohmio, se construye mediante una columna de mercurio encerrada en un tubo de vidrio de 106 cm. de largo por 1 mm² de sección constante. El mercurio se purifica químicamente y se destila en el vacío. El tubo se escoge cuidadosamente y se comprueba su diámetro constante, por los mismos



Fig. 63

procedimientos que se emplean cuando se trata de construir termómetros.

La disposición del tubo, suele ser la que se indica en la figura 63, terminándolo en dos recipientes de diámetro mucho mayor que el tubo, para sumergir en ellos los extremos del circuito exterior.

El metal que se sumerja en los recipientes debe ser inalterable por el mercurio y no debe producir fuerza electromotriz de contacto por las diferencias de temperatura.

En algunos tipos, y a fin de reducir el espacio ocupado por el tubo, se arrolla éste en uno o varios bucles y se coloca dentro de un vaso cilíndrico protector pendiente de su tapa, en la cual se asientan los dos capsulitas que forman los bornes del aparato. El vaso protector se llena de petróleo, constantemente removido por agitadores mecánicos y enfriado exteriormente con hielo, con objeto de operar siempre a cero grados.

La variación de resistencia del mercurio, con la temperatura, se calcula mediante la fórmula

$$R_t = R_0(1 + 0'0008649t + 0'0000112t^2)$$

La figura 64 representa también resistencias tipos, de la casa Carpentier, construídas con hilos

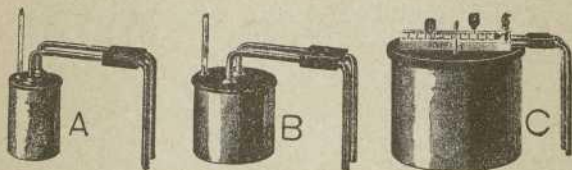


Fig. 64. — Resistencias tipos Carpentier

metálicos, cuyo coeficiente de temperatura se conoce perfectamente.

Los conductores van encerrados en cajas metálicas, rellenas de parafina, como aislante eléctrico y térmico, que les evite las variaciones bruscas de temperatura exterior.

Cada una lleva un termómetro, envuelto también por la parafina, con objeto de conocer la temperatura interior en el momento de operar.

Las resistencias terminan en gruesos conductores de cobre, con sus extremos dirigidos hacia abajo, para introducirlos en capsulitas de mercurio.

rio, que aseguren buen contacto con el circuito de pruebas.

A y *B* son resistencias de un ohmio; *C*, es una caja de 10 resistencias de un ohmio cada una, llevando en su cubierta un combinador de bloques y clavijas, que permite emplear y comprobar separadamente cada una de las resistencias compo-

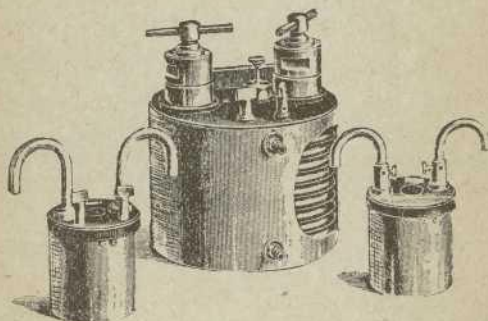


Fig. 65. — Resistencia de la casa Hartmann Braun

nes, y montarlas unidas en serie o en derivación.

La figura 65 representa otros patrones de resistencia construídos por la casa Hartmann y Braun. Contiene carretes de hilo grueso, de manganina, aislado mediante una envoltura de seda barnizada con goma laca. Los carretes van encerrados en baños de petróleo, y sus extremos se sueldan con plata a los bornes de empalme.

Grandes resistencias para débiles intensidades. —

Al estudiar los potenciómetros, hemos visto indicadas repetidas veces, las resistencias de 10000 ohmios, en circuitos recorridos por la débil corriente nacida en un elemento de pila.

La figura 66 representa una caja de resistencias construída por la casa Carpentier, que contiene

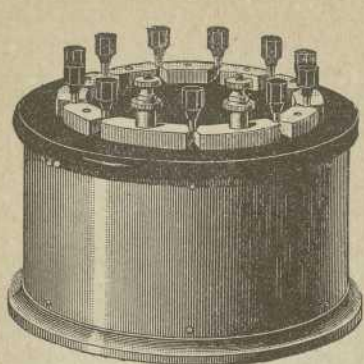


Fig. 66. — Grandes resistencias; 1 megohmio Carpentier

diez carretes de 10000 ohmios cada uno, o sea, en total, 1 megohmio, pudiendo resistir una tensión hasta de un millar de voltios.

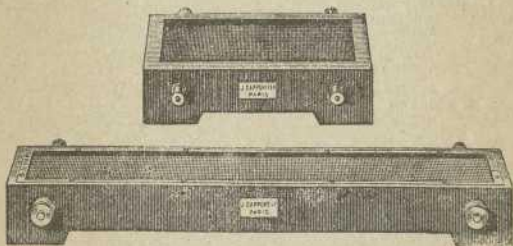


Fig. 67. — Resistencias para grandes intensidades. Carpentier

Resistencias para grandes intensidades. — Para resistir grandes intensidades, se construyen las resistencias representadas en la figura 67, con

anillos de manganina, calculando su diámetro de manera que presenten suficiente superficie de enfriamiento para la potencia máxima que deben absorber. De este modo, el paso de la corriente produce una variación de temperatura, y como consecuencia, una variación de resistencia, completamente despreciables para todas las aplicaciones de electrometría industrial.

Estas resistencias se emplean especialmente en la medición de intensidades por medio de la diferencia de tensión.

Para tener gran superficie de enfriamiento, se forma la resistencia por varios hilos finos, unidos

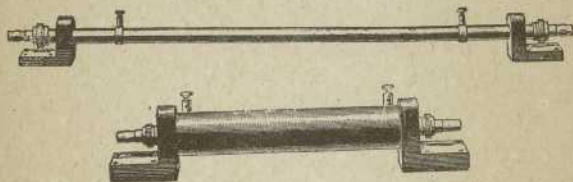


Fig. 68. — Resistencias con circulación de agua. Carpentier

en paralela y soldados por sus extremos a dos barras de cobre, de gran sección, por donde reciben la corriente.

El coeficiente de temperatura de las ligas metálicas empleadas es tan pequeño, que aun cuando el aparato se caliente por el paso de la máxima corriente tolerada, la resistencia no llega a aumentar media centésima del valor marcado.

Las resistencias llevan dos bornes grandes para la entrada y la salida de la corriente y otros dos bornes menores para tomar derivaciones, oficiando de shunt.

La misma casa Carpentier construye también para grandes intensidades, resistencias con circulación de agua, representadas en la figura 68.

En estas se evita completamente la variación de temperatura y, por lo tanto, de resistencia.

Están constituidas por un tubo de mélichior, soldado a dos bloques macizos de cobre, por donde reciben la corriente.

Dos bornes de empalme fijos sobre el tubo limitan exactamente la resistencia marcada.

El tubo termina en dos enchufes apropiados para poner en ellos tubos de goma que lleven la corriente de agua al aparato.

Otra forma de constitución de resistencias para corrientes de alguna intensidad, es la formada por una pieza cilíndrica de porcelana, cuya sección es una cruz, y lleva en los bordes de sus brazos ranuras pertenecientes a una hélice, para fijar las vueltas de un hilo de mélichior.

Caja de resistencias. — Cuando se trata de intercalar resistencias en circuitos de corrientes débiles, se emplean las cajas de resistencias.

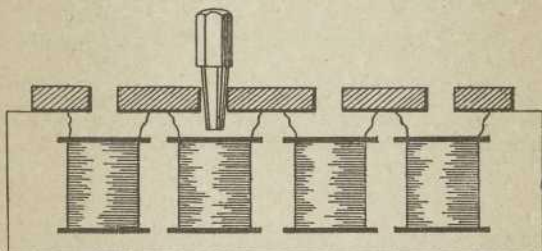


Fig. *69

Se reducen éstas a una serie de carretes de hilo fino de mélichior, encerrados en una caja de madera con cubierta de ebonita, cuya sección se representa en la figura 69. Entre los bornes finales del aparato, pueden intercalarse todos los carretes, o

bien, puede suprimirse algunos de ellos, introduciendo una clavija metálica entre los bloques que van en la cubierta de la caja y que, como se ve, comunican con los extremos de los carretes.

Los carretes van calibrados y señalada su resistencia entre los bloques con que comunican sus extremos. La resistencia entre borne y borne, será la suma de las correspondientes a los orificios sin clavija.

El cálculo de estas cajas no tiene nada de particular, porque estando destinadas a corrientes débiles, no hay que tener en cuenta densidad de corriente.

Caja de décadas. — La caja de resistencias que acabamos de describir, lleva tantas clavijas como

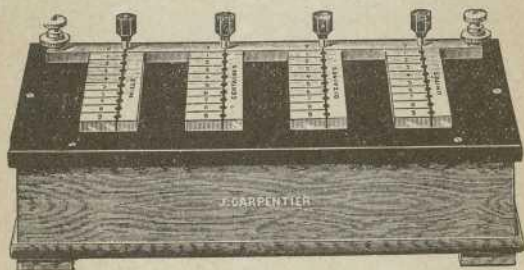


Fig. 70

carretes, y como el contacto con los bloques es inseguro, puede dar lugar a mediciones erróneas.

Para disminuir el número de clavijas, se construyen las cajas de décadas, representadas por la figura 70.

Cada década se compone de diez bloques que, mediante una clavija, pueden comunicar con la tira metálica que llevan al lado.

Entre cada dos bloques va intercalado un carrete

de resistencia. Si se pone la clavija en la posición 0, la corriente que entra por la tira saldrá por el primer bloque sin atravesar resistencia alguna. Si la clavija ocupa sucesivamente las posiciones 1, 2, 3... 9 la corriente, buscando la salida a través de los bloques y los carretes intercalados, tendrá que atravesar las resistencias 1, 2, 3... 9.

Generalmente, estas cajas llevan cuatro líneas de bloques, siendo los carretes en cada una de las líneas de 1, 10, 100 y 1000 ohmios. Montados en serie todas estas resistencias, la lectura de la resistencia total se reducirá a leer las cifras correspondientes a las posiciones de las cuatro clavijas, en las líneas de los ^millares, centenas, decenas y unidades.

Caja circular en décadas. — En lugar de disponer las unidades, decenas, centenas y millares de oh-

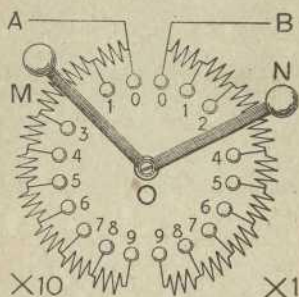


Fig. 71

mios, en cuatro líneas, se reducen a dos círculos mediante la disposición que se indica en la figura 71.

Se colocan los diez bloques que corresponden a una serie de resistencias, en un semicírculo, y los diez de la serie siguiente en el otro semicírculo,

uniendo los dos mediante dos palancas de contacto, que giran alrededor de un mismo eje.

Si los carretes de la izquierda son decenas de ohmios y los de la derecha son unidades, la resistencia entre *A* y *B* vendrá expresada por el número formado con las cifras correspondientes a las posiciones de las palancas.

La figura 72 representa una resistencia dispuesta en décadas, construída por la casa Hartmann,

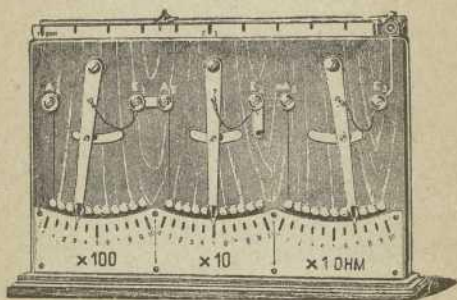


Fig. 72. — Reostato en décadas Hartmann

marcándose las centenas, decenas y unidades por las posiciones de sus tres palancas.

Para apreciar centésimas de ohmios, lleva el aparato en su parte superior, un hilo de mélichior, que va de la izquierda a la derecha y vuelve de la derecha a la izquierda, presentando las dos partes, paralelas y muy próximas. La resistencia total del hilo es de un ohmio y para tomar una fracción de él, se unen la ida y la vuelta apoyando en ellas un frotador de metal.

La casa Hartmann Braun construye para grandes intensidades las resistencias representadas en

la figura 73 dispuestas en décadas y accionadas mediante palancas que giran alrededor de un eje horizontal. Los hilos resistentes son metálicos, de manganina, y arrollados sobre láminas de mica. Con esto el reóstato está en inmejorables condiciones de enfriamiento y además, siendo finas las láminas de mica, resultan las vueltas de hilo metálico sin superficie, y, por lo tanto, sin efecto de autoinducción.

Cada una de las décadas está contenida en una caja especial, independiente de las otras, por lo

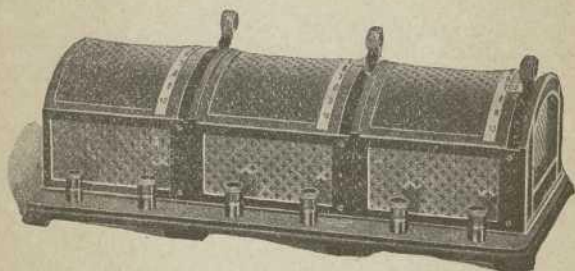


Fig. 73. — Resistencia Hartmann Braun para gran intensidad

cual lleva el aparato en su parte anterior, seis bornes, para unir una década con otra y con el circuito exterior, o bien, emplearlas separadamente.

Los tipos corrientes de estas resistencias son de 0'1 a 1000 ohmios, resistiendo una corriente de 10 a 0'1 amperios y pudiendo absorber de 1 a 100 voltios.

Ohmímetros. — Los ohmímetros son aparatos destinados a medir grandes resistencias, por procedimientos de *lectura directa*, en los cuales se busca con mayor empeño la comodidad que la exactitud.

El empleo de los ohmímetros, está indicado en la determinación de resistencias de aislamiento, de líneas, de instalaciones interiores y de los circuitos de las máquinas generadoras o motores.

Los ohmímetros son aparatos galvanométricos y, por lo tanto, se encuentran entre ellos los mismos tipos de los galvanómetros conocidos.

Ohmímetro de cuadrante. — Este tipo de ohmímetro está constituido por una caja portátil que contiene sencillamente un galvanoscopio y una pila, dispuestos para completar el circuito mediante una resistencia exterior que deba medirse. Como tal galvanoscopio, medirá intensidades.

$$I = \frac{V}{R}$$

y mientras la tensión de la pila permanezca constante, sus indicaciones dependerán de la resistencia R del

circuito, pudiéndose graduar su escala directamente en ohmios.

Generalmente, estas cajas tienen tres bornes de empalme A , B , C (fig. 74), correspondientes a dos grados de sensibilidad del aparato. Si el circuito se cierra entre los bornes B y C , del carrete multiplicador, sólo se aprovechan la mitad de las vueltas, en cambio, si empalmamos la resistencia exterior entre los bornes A y C , utilizaremos todas las vueltas y la sensibilidad será doble.

Como se ve, el aparato es sencillísimo; pero siendo imposible mantener constante la tensión de la pila, sus indicaciones son muy poco seguras.

Tipo Chauvin y Arnoux. — Para corregir los defectos del aparato anterior, la casa Chauvin y

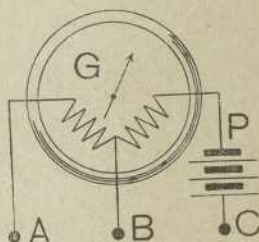


Fig. 74

Arnoux construye un ohmímetro de cuadrante, portátil, de tamaño reducido y con compensación, que representamos esquemáticamente en la fig. 75.

El galvanómetro G es aperiódico, de precisión y con dos sensibilidades según se emplee todo el devanado de su carrete multiplicador, o solamente una parte.

La pila P está compuesta de 16 elementos secos

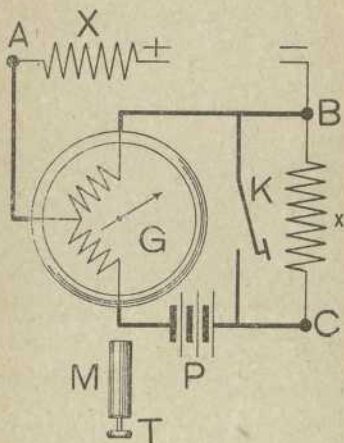


Fig. 75

y la influencia de sus variaciones de tensión, se corrigen muy fácilmente.

Mediante un *tornillo de corrección* T , que sale al exterior del aparato, se mueve un imán M , que alejándose o aproximándose a la aguja del galvanómetro, varía convenientemente su sensibilidad. Para acomodar la sensibilidad del aparato a la tensión de la pila P se cierra ésta sobre el galvanómetro, oprimiendo al botón K , y se actúa sobre el tornillo de corrección hasta conseguir que la

aguja marque exactamente el cero de resistencia exterior (que será el máximo de intensidad).

Esta corrección, compensa variaciones muy importantes de la fuerza electromotriz de la pila, pudiendo variar entre 0'8 y 1'5 de la tensión normal.

La pila deberá darse por gastada, cuando la corrección anterior no pueda conseguirse aun con el máximo alejamiento del imán.

La caja que contiene el aparato tiene tres bornes de empalme *A*, *B*, *C*, además del tornillo *T* y del botón *K*.

Medida de resistencias ordinarias. — Para medir una resistencia ordinaria, empleando la batería de pilas del aparato, empezaremos por comprobar su estado, oprimiendo el botón *K* y, si fuera preciso, corregiremos su sensibilidad actuando sobre el tornillo *T*.

Se deriva entre los bornes *B* y *C* la resistencia desconocida x y se lee su valor en la escala superior del cuadrante.

En la figura se ve perfectamente que, en cualquier momento, aún teniendo empalmada entre *B* y *C* la resistencia que se mide, puede comprobarse la pila, oprimiendo *K*, y arreglarse la sensibilidad del galvanómetro mediante *T*.

Medida de una resistencia con tensión. — Al comprobar el aislamiento de una línea, debe medirse la resistencia que hay entre esta línea y el suelo, o entre los dos conductores a través de los aisladores, soportes, etc.

Puede operarse con el ohmímetro de cuadrantes, utilizando como generador la misma tensión de la red, si es continua.

Si la tensión de servicio es de 70 a 125 voltios, se unen primeramente los bornes *A* y *B*, sin resistencia alguna, a los dos hilos de la canalización

y se regula la acción del imán M para que el índice marque el cero de resistencia en la graduación inferior.

Se intercalan después entre el $+$ y $-$ de la línea, el aparato por sus bornes AB , y la resistencia X que se quiere medir. La graduación R , que leemos en el cuadrante, nos dará la resistencia buscada

$$X = R$$

Método del puente de Wheatstone. — En el tomo I (pág. 112), convinimos que cuando el puente de

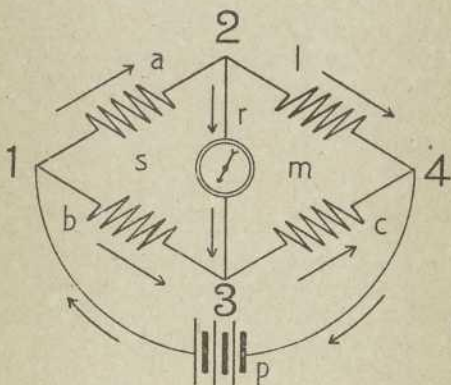


Fig. 76

Wheatstone está equilibrado, no pasa corriente por un receptor o galvanómetro, situado en una de sus diagonales, y se verifica entre sus lados la relación (fig. 76)

$$ac = bl \quad \text{o} \quad c = \frac{b}{a}l$$

Coloquemos en a y b dos resistencias constantes y conocidas; en c la resistencia que queremos

medir, y en l una resistencia que podamos variar a voluntad, hasta conseguir que el galvanómetro no acuse corriente, y podremos conocer c , por la proporción anterior.

Los brazos a y b , se llaman *de proporción*, y en los modelos corrientes, están constituidos por tres carretes cada uno de 10, 100 y 1000 ohmios.

El brazo l llamado *de comparación*, es una caja de resistencias, que puede variar de 1 a 10000 ohmios.

Con estos brazos, las medidas extremas serán

$$c_{\text{máx.}} = \frac{1110}{10} \times 10000 = 1110000$$

$$c_{\text{mín.}} = \frac{10}{1110} \times 1 = 0'009009$$

Para que el cálculo sea cómodo, se adoptan para la relación $\frac{b}{a}$ los valores 100, 10, 1, 0'1 y 0'01, según la resistencia que debe medirse, o la aproximación que se desee.

Caja de resistencias con puente. — Las cajas de resistencias que se emplean en las mediciones, suelen estar dispuestas de manera que puedan conexiarse la pila y el galvanómetro, para obtener un puente de Wheatstone. La figura 77 da idea de esta disposición. Las resistencias OA y OB son los brazos de proporción; las $AEFH$ forman el brazo de comparación, y BH es la resistencia que se quiere medir.

La pila y el galvanómetro, no comunican de un modo permanente con los vértices del paralelogramo, sino a través de los interruptores m y n .

Para operar, debe cerrarse primeramente el m , y cuando la corriente ha alcanzado su régimen

normal, se cierra el n . Este último, sólo durante un momento; porque si el galvanómetro es atra-

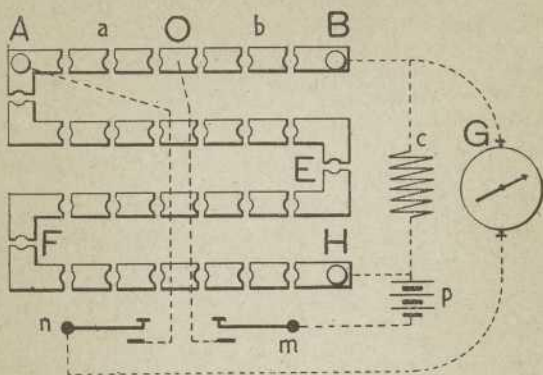


Fig. 77

vesado por una corriente intensa, puede calentarse estando mucho tiempo en circuito.

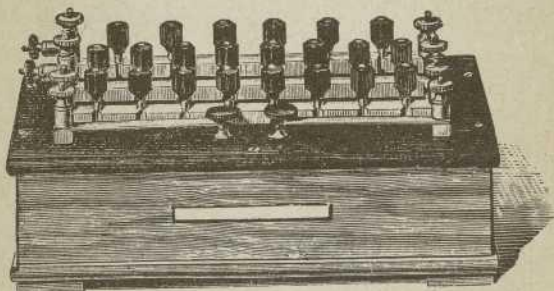


Fig. 78

La figura 78 representa en conjunto un puente con sujeción a los principios anteriores.

Puente con hilo de afinación. — Si al operar con el puente de Wheatstone no puede conseguirse el equilibrio exacto, y para valores del brazo de comparación l y $l + 1$ se observan en el galvanómetro las desviaciones δ y δ' en sentido contrario, puede adoptarse como resistencia exacta la dada por la fórmula

$$c = \frac{b}{a} \left(l + \frac{\delta}{\delta + \delta'} \right)$$

Puede evitarse el empleo de la fórmula anterior y conseguirse siempre el equilibrio, adicionando al

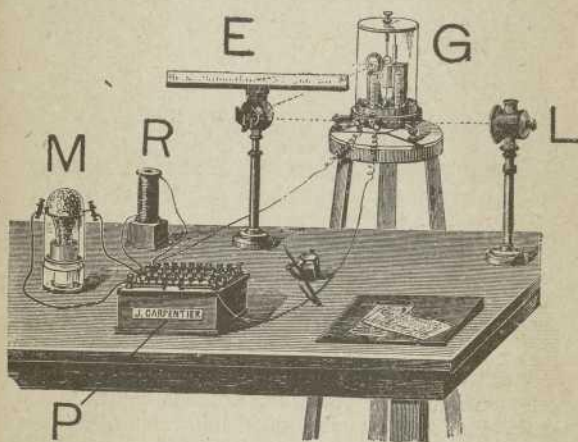


Fig. 79. — Instalación completa. Puente ordinario Carpentier

puente un hilo de afinación de un ohmio exactamente, puesto a continuación del brazo l , y del cual se toma una fracción perfectamente conocida.

La figura 79 representa una instalación completa para la medición de resistencias ordinarias, por

el método del puente de Wheatstone, con aparatos de la casa Carpentier.

Contiene, una caja de resistencias con puente (P); un elemento de pila Meidinger (M); la resistencia que se desea medir (R); un galvanómetro D'Arsonval (G) en soporte separado de la mesa de pruebas; una luz (L) para el galvanómetro, y una escala (E) para observar por reflexión las desviaciones del galvanómetro.

Puente de hilo y regla graduada. — En la fórmula que expresa el equilibrio del puente, hemos dicho que pueden conservarse constantes a y b ,

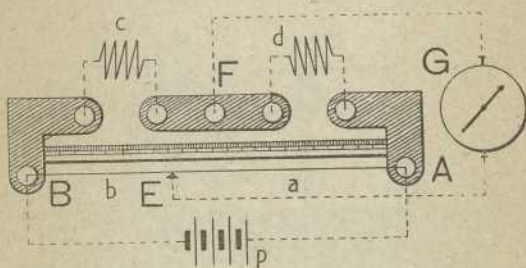


Fig. 80

haciendo variar únicamente l . Del mismo modo puede utilizarse la fórmula, conservando l constante y haciendo variar la relación $b : a$. Este es el fundamento del puente de hilo y regla dividida, representado en la figura 80.

Entre los bornes A y B , hay un hilo tirante, de platino, apoyado por uno de sus puntos en una corredera movable E . Entre A y F se intercala una resistencia d , constante, y entre F y B , se pone la resistencia c que quiere medirse.

Es fácil, ver en la figura, que queda formado un

paralelogramo, cuyos vértices son *A*, *E*, *B*, *F*, y en cuyas diagonales *EF* y *AB*, van empalmados el galvanómetro y la pila, respectivamente.

Se consigue el equilibrio, moviendo a derecha e izquierda el contacto *E*, y cuando se haya logrado que el galvanómetro no acuse corriente, tendremos

$$ac = bd \quad \text{o} \quad c = \frac{b}{a}d$$

midiendo *a* y *b* en la regla graduada, que el aparato tiene paralelamente al hilo de platino.

Puente doble de Thomson.—El puente de Wheatstone, estudiado anteriormente, no permite

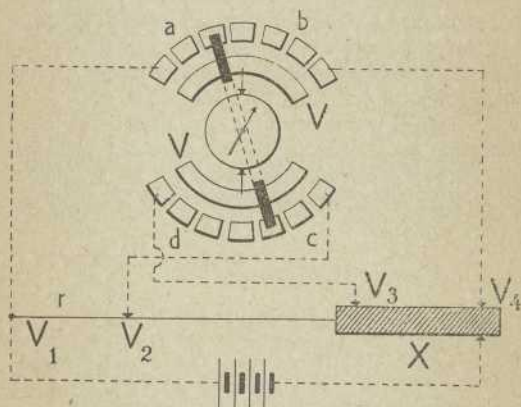


Fig. 81

medir resistencias inferiores a 0,009 de ohmio, ni debe emplearse cuando se trate de resistencias pequeñas, próximas a este límite, porque, entonces, pueden alterar los resultados los malos con-

tactos de clavijas y bornes que se intercalan en el circuito. Para estos casos, se emplea con ventaja el doble puente de Thomson.

Sea X una barra metálica, por ejemplo (fig. 81), cuya pequeña resistencia se quiere medir.

Se une, en serie, con un hilo de mélichior $V_1 V_2$, grueso, uniforme y de resistencia conocida. Se conexionan ambos conductores, como se indica en la figura, con una pila, un galvanómetro y cuatro resistencias a, b, c, d , que cumplan la condición

$$\frac{a}{b} = \frac{c}{d} \quad [1]$$

Para operar, se mueve la corredera V_2 hasta que el galvanómetro no acuse corriente; en este momento puede asegurarse que el potencial en ambos bornes de galvanómetro es el mismo.

Conseguido el equilibrio, llamemos $V V_1 V_2 V_3 V_4$ a los potenciales en los puntos señalados con estas letras, y teniendo en cuenta que la intensidad debe ser constante a lo largo de un circuito, tendremos en los tres por los que circula la corriente de la pila

$$\begin{aligned} \frac{V_1 - V}{a} = \frac{V - V_4}{b} & \quad \text{o} \quad \frac{V_1 - V}{V - V_4} = \frac{a}{b} \\ \frac{V_2 - V}{c} = \frac{V - V_3}{d} & \quad \text{o} \quad \frac{V_2 - V}{V - V_3} = \frac{c}{d} \\ \frac{V_1 - V_2}{r} = \frac{V_3 - V_4}{x} & \quad \text{o} \quad [2] \quad \frac{V_1 - V_2}{V_3 - V_4} = \frac{r}{x} \end{aligned}$$

Las dos primeras proporciones, recordando la [1] nos dan

$$\frac{V_1 - V}{V - V_4} = \frac{V_2 - V}{V - V_3} = \frac{a}{b}$$

y restando, término a término, las dos primeras razones

$$\frac{V_1 - V_2}{V_3 - V_4} = \frac{a}{b}$$

esta proporción y la [2], tienen las primeras razones iguales, podremos, por lo tanto, igualar las segundas y resultará

$$\frac{r}{x} = \frac{a}{b}$$

Podremos conocer x , multiplicando r por la relación $\frac{b}{a}$.

Puente de conductibilidad.— Como aplicación del puente de Thomson, se construye un puente especial, llamado de conductibilidad destinado a



Fig. 82. — Puente de conductibilidad

determinar la conductibilidad de las muestras de cobre, referida en tanto por ciento, a la de un cobre tipo.

En este puente (fig. 82), las cuatro resistencias de proporción son siempre iguales, por lo cual no necesita combinador ni frotadores, y tiene las resistencias ocultas en la peana del aparato. La fórmula general del puente de Thomson se reducirá en este caso a

$$x = r$$

El hilo de mélichior, está aquí substituído por la varilla tipo, de cobre electrolítico, y de diámetro exactamente igual al de los conductores que se van a ensayar. Esta varilla de cobre tipo, ocupa en la figura la parte anterior del aparato C. El contacto movable se pone generalmente en la centésima división de la regla graduada.

La varilla que se estudia, se coloca en la parte posterior del aparato *c* y sobre ella se apoyan dos contactos movibles, cuya separación se tantea hasta conseguir el perfecto equilibrio del puente.

Sean 100 y *C* la longitud y conductibilidad de la barra de cobre tipo, y *l* y *c* la longitud y conductibilidad de la muestra que se ensaya. Siendo igual la sección *s* de ambas barras, tendremos, cuando el puente esté equilibrado:

$$x = r \quad \text{o} \quad \frac{1}{C} \frac{100}{s} = \frac{1}{c} \frac{l}{s}$$

de donde se deduce

$$c = \frac{l}{100} C$$

Por lo tanto, basta medir la separación *l* de los contactos movibles, en las mismas unidades que la varilla tipo, y tendremos la conductibilidad de la muestra comparada con la del cobre puro.

El aparato lleva dos bornes *G* para el galvanómetro y otros dos *P* para la pila.

Método de substitución. — Para medir una resistencia por substitución, se constituye un circuito por una pila, un galvanómetro y la resistencia desconocida. Al lanzar la corriente, el galvanómetro marcará una desviación que siempre podrá mantenerse dentro de la escala, empleando un *shunt* si fuera preciso.

Se substituye la resistencia desconocida, por una caja, graduando ésta hasta conseguir que el galvanómetro acuse la misma desviación que en el primer experimento. La resistencia dada a la caja será la buscada.

Método de galvanómetro diferencial.— El galvanómetro diferencial puede emplearse para la

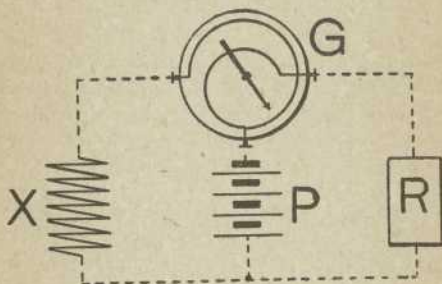


Fig. 83

medición o comparación de resistencias, conexiéndolo de diversos modos según los casos.

1.º *Resistencias mayores que las del galvanómetro.*— Las entradas de los circuitos se unen a una pila (fig. 83), y las salidas, a la resistencia desconocida X y a una caja R . Variemos la resistencia R y cuando consigamos que el galvanómetro no acuse corriente, podrá asegurarse que por sus dos circuitos circula igual intensidad, lo cual nos indica que $x = R$.

Si la resistencia R no varía de un modo continuo, como sucede con las cajas ordinarias, puede suceder que el galvanómetro oscile a un lado con la resistencia R y al lado contrario con la resistencia $R + 1$. Midiendo las oscilaciones α y α' en los

dos sentidos, tomaremos como resistencia exacta, la dada por la fórmula

$$x = R + \frac{\alpha}{\alpha + \alpha'}$$

2.º *Resistencias mucho menores que las del galvanómetro.* — En este caso, es preferible formar un

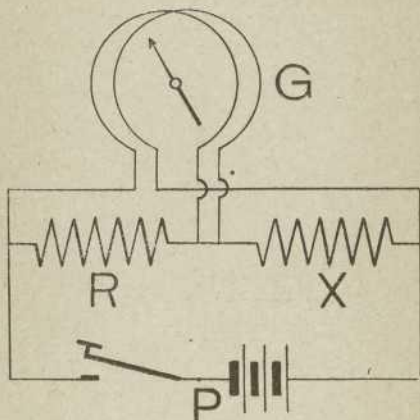


Fig. 84

circuito como se indica en la figura 84, poniendo en serie con el generador, las dos resistencias R y x . Con los dos circuitos del galvanómetro diferencial, se miden simultáneamente las tensiones en los extremos de cada una de las resistencias.

$$V = RI \quad V' = xI$$

y cuando la aguja del galvanómetro permanezca fija en el cero, tendremos $V = V'$ y, por lo tanto,

$$RI = xI \quad \text{o} \quad R = x$$

3.º *Galvanómetro con circuitos desiguales.* — Para operar con un galvanómetro que no sea perfectamente diferencial, se permutan R y x , y se tantea R hasta que el galvanómetro indique la misma desviación en cualquiera de las posiciones.

Cuando esto se consiga, tendremos seguramente

$$x = R$$

Resistencia interior de una pila. — **Método de Mance.** — Se coloca la pila en uno de los brazos

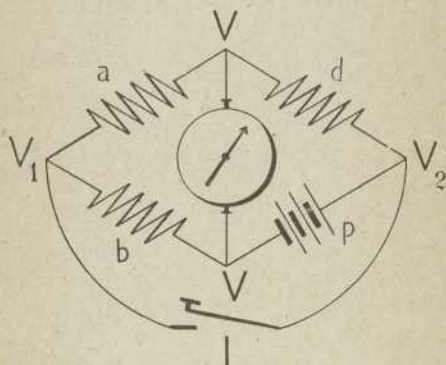


Fig. 85

del puente (fig. 85), y se tantea la resistencia d , hasta que el galvanómetro no se mueva, abriendo y cerrando el interruptor I . En este caso, puede asegurarse que los bornes del galvanómetro, están a un mismo potencial V . Llamando V_1 y V_2 a los potenciales de los otros dos vértices del paralelogramo, y recordando la constancia de la intensidad a lo largo de un circuito, tendremos

$$\frac{V_1 - V}{a} = \frac{V - V_2}{d} \quad \text{y} \quad \frac{V_1 - V}{b} = \frac{V - V_2}{p}$$

y dividiendo miembro a miembro las dos proporciones, resulta

$$\frac{a}{b} = \frac{d}{p} \quad \text{o} \quad p = \frac{b}{a}d$$

Resistencia de los acumuladores.—El acumulador, durante la descarga, puede considerarse

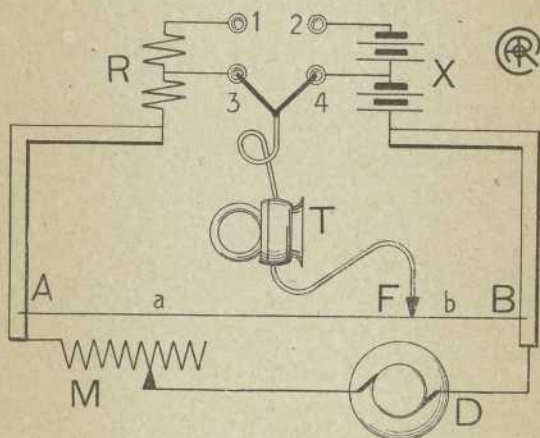


Fig. 86

como una pila, y, por lo tanto, podrá medirse su resistencia interior por los mismos procedimientos indicados para las pilas; pero teniendo en cuenta que las intensidades son siempre mucho mayores en éstos que en aquéllas

Puede emplearse para la medición el puente de Wheatstone de hilo y regla, utilizando como generador, la misma dínamo que sirva para la carga de la batería.

La resistencia de comparación R (fig. 86), se

forma de alambres metálicos gruesos, unidos en paralela, de manera que soporten bien toda la corriente de carga de la batería X .

La resistencia de comparación y la batería se dividen en dos partes cada una, próximamente iguales, y reciben comunicación eléctrica mediante recipientes de mercurio 1, 2, 3, 4.

El teléfono termina por un lado en el frotador movable y por el otro, en una pieza metálica en forma de Y para formar un doble contacto con las capsulitas 3 y 4, o con las 1 y 2.

Se emplea como generador, la dínamo de carga D , en serie con el reductor M .

La corriente de la dínamo, no es absolutamente continua, sino enderezada por el juego del colector de láminas, por lo tanto, el teléfono T acusará ruido mientras el puente no esté equilibrado, es decir, mientras no se verifique.

$$Rb = aX \quad \text{o} \quad X = \frac{b}{a}R$$

Conociendo la resistencia de una serie de elementos de acumulador, será fácil deducir la de uno de ellos.

Generalmente, se hacen cuatro mediciones colocando la pieza Y del teléfono en los cuatro pares de capsulitas 3-4, 1-2, 1-4 y 3-2, tomando como exacta la media aritmética de las cuatro mediciones.

Este método es debido a Bocali.

Resistencia de un galvanómetro. — Si se dispone de otro galvanómetro además del que queremos medir, se tratará como una resistencia cualquiera y se medirá por cualquiera de los métodos conocidos.

Si el galvanómetro es muy sensible, se frenará su órgano movable para evitarle choques violentos.

tos, y se cuidará de no enviarle grandes corrientes que pudieran calentar con exceso sus devanados.

Es buena precaución, el shuntar la pila que se emplea en estas mediciones, poniendo en el shunt muy poca resistencia al empezar y aumentándola sucesivamente a medida que nos aproximamos al equilibrio del puente o galvanómetro diferencial empleado. De este modo, la corriente es pequeña al empezar y crece su intensidad para afinar el equilibrio, sin peligro para el aparato.

Método de Thomson. — Se coloca el galvanómetro en uno de los brazos del puente (fig. 87).

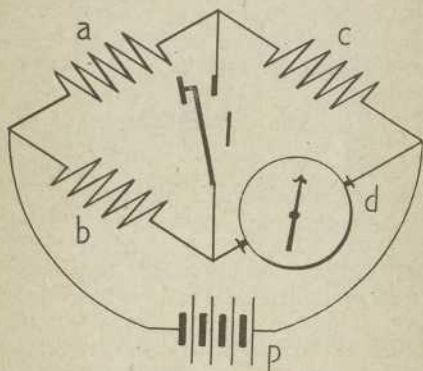


Fig. 87

En una de las diagonales se coloca un interruptor, y, en la otra, la pila, como en el puente ordinario.

Se hace variar la resistencia *c*, hasta que la desviación del galvanómetro no se altere al abrir y cerrar el interruptor, lo cual indicará que por *I* no circula corriente, es decir, que el puente está equilibrado.

Resistencia de un líquido.— La resistencia de los líquidos debe medirse encerrándolos en tubos de dimensiones conocidas, y midiendo la de la columna líquida, limitada por dos tapones metálicos. Si se trata de líquidos inalterables por la corriente, la operación se realiza por los métodos ordinarios; pero si el líquido es electrolizable, deberán tomarse precauciones especiales, para que

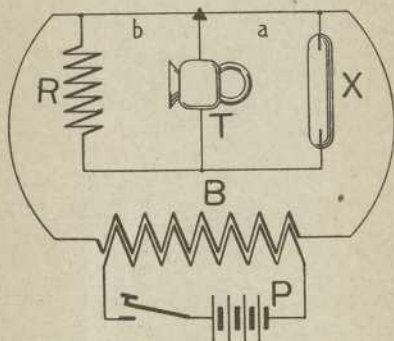


Fig. 88

los efectos de polarización no alteren los resultados.

He aquí el procedimiento ideado por M. Kohlrausch. Se forma un puente de Wheatstone $abRX$, (fig. 88), colocando en la diagonal donde generalmente está el galvanómetro, un receptor telefónico T . Como generador de corriente, se emplea un carrete de Rumkorff cuyo primario se alimenta con la corriente intermitente de una pila P , y cuyo secundario se une a la otra diagonal del puente.

Siendo así alternativa la corriente empleada, no son de temer los efectos de polarización en el

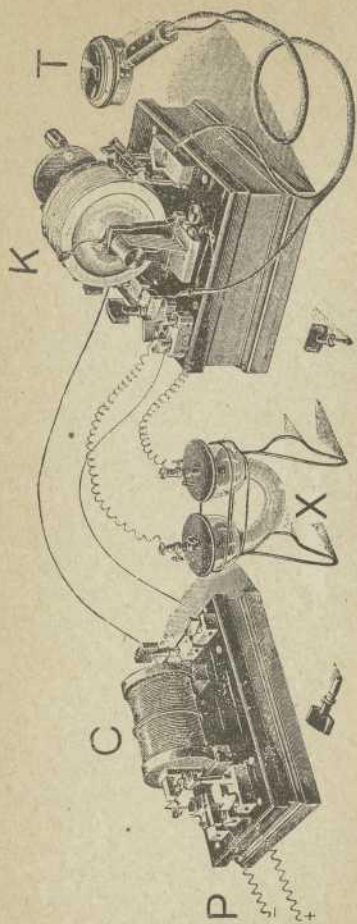


Fig. 89

líquido X , pero en cambio deberán evitarse las resistencias autoinductivas, para lo cual, se constituyen los brazos a , b , con hilo de platino, estableciéndose la proporción conveniente, por la situación de un contacto movable.

Cuando el receptor telefónico no acuse ruido alguno, podrá darse por equilibrado el puente.

El teléfono se reducirá al silencio completo, sólo cuando los brazos R y X del puente tengan la misma resistencia e igual capacidad, o bien, cuando en cada uno de los brazos, la capacidad quede compensada con una autoinducción.

Cuando domine el efecto de la capacidad de uno de los brazos, al cesar la corriente de carga procedente del carrete, se produce una corriente de descarga procedente de la capacidad, que cierra su circuito, a través del teléfono y le hace sonar.

Por eso se aconseja en la práctica del método de Kohlrausch, *que se dé por equilibrado el puente cuando el teléfono se reduzca al silencio o produzca un ruido mínimo*, es decir, cuando el ruido, si existe, sea producido únicamente por el efecto de capacidad de uno de sus lados y no por una diferencia de tensión entre los vértices unidos por el teléfono.

La figura 89 representa una instalación completa, para practicar el método de Kohlrausch, con aparatos contruídos por la casa Hartmann Braun, siendo: C , el carrete de Rumkorff alimentado su primario por los hilos P ; X , es la resistencia líquida desconocida; K es el puente, y T el teléfono que substituye al galvanómetro.

El puente K tiene exactamente la disposición indicada en la figura esquemática; pero el hilo ba , para que sea largo y no aumente las dimensiones del aparato, se dispone arrollado en diez vueltas de hélice sobre un cilindro de mármol blanco. El cilindro tiene su eje roscado, con igual paso que la hélice del hilo resistente, de manera que rodan-

do, avanza en el sentido del eje, y un frotador fijo se apoya siempre en un punto del hilo, variable según la relación $a : b$ de segmentos que se desee.

Los extremos del hilo resistente comunican con los extremos del eje del cilindro, que son eléctricamente independientes uno de otro, y comunican con el resto del circuito, mediante frotadores en forma de escobillas, formadas por 20 hilos de cobre.

En el mismo zócalo del aparato, está la resistencia R , formada por carretes de 1, 10, 100 y 1000 ohmios, que pueden ponerse o quitarse del circuito mediante clavijas de contacto, como en las cajas de resistencias ordinarias.

Puente simplificado de Kohlrausch. — La figura 90 representa un puente de igual fundamento

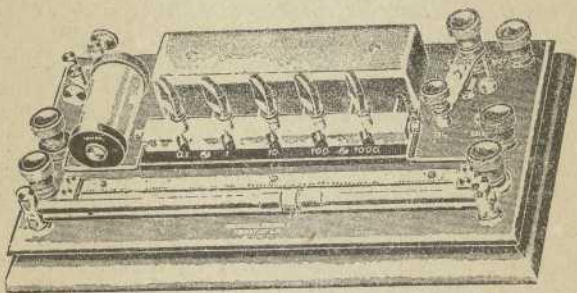


Fig. 90

y funcionamiento que el de Kohlrausch, pero reuniendo sobre una sola peana todos los elementos necesarios para efectuar una medición.

La resistencia de compensación se compone de cinco carretes de 0'1, 1, 10, 100 y 1000 ohmios.

El hilo resistente para formar los dos brazos de proporción es rectilíneo.

Sobre la misma peana, va un pequeño carrete de Rumkorff, para el empleo de corriente alterna.

El aparato tiene seis bornes de empalme, para el generador de continua, para el galvanómetro y para la resistencia desconocida.

Método de la caída óhmica. — Se puede conocer la resistencia de un circuito, haciendo circular por él una corriente continua conocida, y se mide la diferencia de tensión mediante un voltímetro, en los bornes del circuito. La ley de Ohm nos permitirá calcular la resistencia desconocida.

$$R = \frac{V}{I}$$

Este método puede aplicarse estando el receptor en servicio, siempre que éste no produzca fuerza electromotriz, y por eso el resultado obtenido recibe el nombre de *resistencia en caliente* del receptor considerado.

Galvanómetro universal de Siemens. — La casa Siemens y Halske, de Berlín, construye un aparato llamado galvanómetro universal, con el cual pueden realizarse *medidas de resistencia, tensión e intensidad*, con mayor comodidad que la permitida por algunos procedimientos anteriores.

El aparato es transportable, y su colocación para operar es sencilla, puesto que no exige nivelación ni son de temer influencias exteriores.

La aproximación que da en sus resultados, es suficiente para todas las aplicaciones industriales.

El aparato representado esquemáticamente en la figura 91, se compone de un *miliamperímetro de precisión C*, con 150 divisiones, cuya resistencia es exactamente de un ohmio; un hilo resistente

$AabB$, dispuesto en arco de círculo, sobre el cual frota un contador móvil E , con graduación que para cualquier posición del contacto nos da la

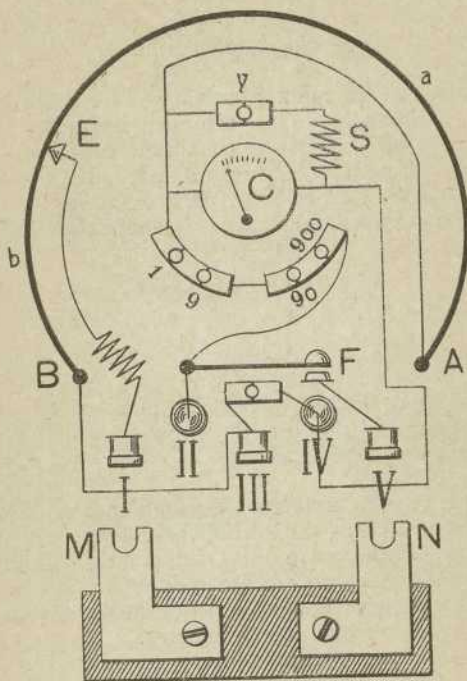


Fig 91

relación de longitudes de los hilos segmentos de $b : a$; cuatro resistencias de 1, 9, 90 y 900 ohmios, montadas entre bloques que pueden ponerlas en corto circuito; finalmente, un shunt S para el miliampe-

rímetro, que puede utilizarse o no, según se ponga o se quite la clavija y.

Para las diversas conexiones, lleva el aparato

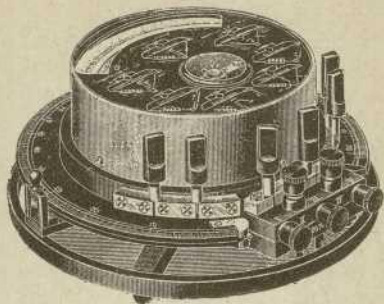


Fig. 92

cinco bornes I, II, III, IV y V, de los cuales I, III y V tienen su eje horizontal, y los II y IV, vertical. La posición de estos últimos, permite empalmar en ellos dos placas de cobre *M* y *N*, montadas so-

bre un aislador, y a las cuales se unen los shunts o circuitos que deben medirse.

Las conexiones de los bornes son: I, con el fro-tador movable; II, con la palanca de un interrup-tor *F*, y con la entrada de la serie de resistencias que terminan en el miliamperímetro *C* y en el principio *A* del hilo resistente; III, con el final *B* del hilo resistente; IV, con la salida del miliamperí-metro, y V con el contacto del interruptor.

Acompañan al aparato clavijas ordinarias y clavijas resistentes, cuyo empleo veremos luego.

La figura 92 representa el aparato Siemens, visto en conjunto y visto por su parte superior.

En la cubierta de ebonita lleva grabados siete esquemas, para facilitar sus conexiones con gene-radores y resistencias, en las diversas operaciones a que se presta.

Medida de una resistencia ordinaria. — La re-sistencia que quiere medirse se empalma a los bornes II y III uniendo mediante una clavija or-dinaria los bornes III y IV. La pila se empalma en-tre I y V.

El aparato, la resistencia y la pila, quedan co-nexionados como se indica esquemáticamente en la figura 93, formándose un cuadrilátero de Wheats-tone *AEBC*, con una diagonal *EC* ocupada por la pila, y otra *AB* por el miliamperímetro.

Disponiendo del brazo *c* de comparación y de la relación de los brazos *a* y *b*, podremos conse-guir el equilibrio del puente y operar como en el puente de hilo y regla graduada.

Las resistencias empleadas en el brazo *c* se pro-cura que sean una o varias, pero siempre a partir de la primera. De este modo el valor de *c* será la unidad seguida de ceros y el producto $\frac{b}{a}c$ se calcula mentalmente con gran facilidad.

Para pequeñas resistencias se mantienen cerradas las resistencias 9, 90 y 900, substituyendo la clavija ordinaria de la 1 por una clavija de resis-

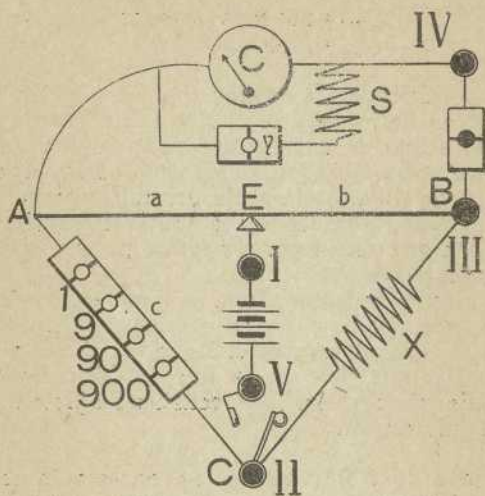


Fig. 93

tencia $\frac{1}{9}$ de ohmio. Con esto el brazo *c* quedará formado por dos resistencias *I* y $\frac{I}{9}$ montadas en cantidad. Será por lo tanto (tomo I, pág. 95)

$$c = \frac{I \times \frac{I}{9}}{I + \frac{I}{9}} = \frac{I}{10} = 0'1$$

La posición del frotador movable sobre el hilo resistente da para valores extremos de la relación

$b : a$, 30 y $\frac{1}{30}$: los valores límites de la resistencia c son 1000 y 0'1, luego las resistencias máxima y mínima que pueden medirse con este aparato serán

$$X = 30 \times 1000 = 30000$$

$$x = 0'03 \times 0'1 = 0'003$$

La precisión de la medida está en relación con la tensión de la batería. Por lo tanto, puede aumentarse ésta de manera que para pequeños movimientos del frotador, obtengamos movimientos bien perceptibles en la aguja del miliamperímetro. Sin embargo, la tensión debe limitarse para que la corriente que circule por el aparato no sea superior a 0'5 amperios.

Cuando la resistencia que se mide es una línea aérea, generalmente no se consigue el equilibrio absoluto del galvanómetro. Debe tantearse la posición del frotador, hasta que la indicación de la aguja, sin ser cero, sea constante apretando o no el interruptor.

Método de Kohlrausch. — Se conecta la resistencia desconocida entre II y III, como en el caso anterior. Se substituye la pila por un generador R , alimentado con corriente alternativa o continua intermitente (fig. 94). Se suprime la comunicación entre III y IV y se deriva un teléfono T , entre III y el primer bloque de las resistencias.

Cuando el sonido del teléfono sea nulo o mínimo, se tendrá equilibrado el cuadrilátero.

Resistencias con fuerza contraelectromotriz. — Cuando la resistencia que se quiere medir puede presentar una fuerza contraelectromotriz, como sucede en el caso de una pila o batería de acumuladores, conviene proteger el miliamperímetro contra la corriente excesiva. Para ello se emplea la disposición de la figura 93, pero poniendo entre

III y IV una clavija de 300 ohmios de resistencia y suprimiendo el shunt, es decir, quitando la clavija de y .

En el caso particular de batería, conviene dividirla en dos partes iguales y conexas en

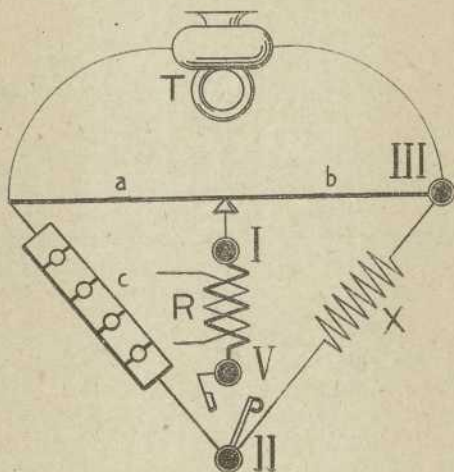


Fig. 94

forma que sus fuerzas electromotrices sean contrarias.

Es claro que siendo X la resistencia hallada para el conjunto de las dos mitades montadas en cantidad, la resistencia de todos los elementos en serie, será $4X$.

Determinación de un contacto con tierra. — Si un conductor tiene un contacto con tierra puede determinarse fácilmente el punto de la derivación.

Se intercala el conductor defectuoso entre II y III uniendo III con IV mediante una clavija ordinaria (fig. 95). En I se pone una pila que tenga el otro polo a tierra.

Para operar se suprime toda la resistencia de *c* y se equilibra solamente mediante el contacto móvil *E*. Es evidente que ahora los vértices del cua-

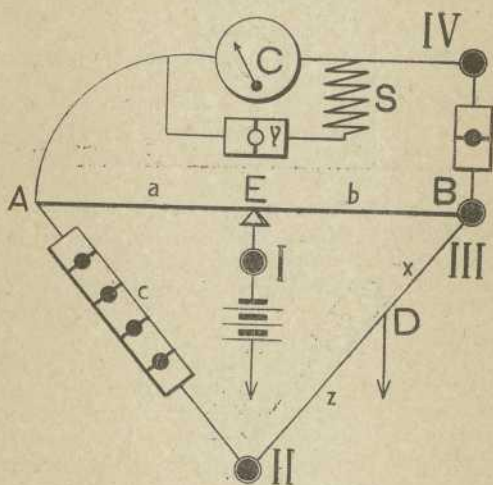


Fig. 95

drilátero son *A*, *E*, *B*, *D*, siendo *D* el punto del conductor en que existe la derivación.

Conseguido el equilibrio se tendrá

$$a \times x = b \times z$$

o bien

$$\frac{a}{b} = \frac{z}{x}$$

Si además conocemos la resistencia total del conductor, que llamaremos l , tendremos

$$l = z + x$$

Entre esta ecuación y la anterior podemos despejar x o z , y tendremos

$$x = \frac{\frac{b}{a} l}{\frac{b}{a} + 1} \qquad z = \frac{l}{\frac{b}{a} + 1}$$

El valor $b : a$ se lee directamente en la posición del contacto movable que nos ha dado el equilibrio.

Conocido x o z , será fácil buscar el punto de derivación midiendo la sección del conductor y calculando la longitud que le corresponde para tener la resistencia hallada.

Medida de grandes resistencias. — La resistencia que se quiere medir, se empalma en serie con un generador de E voltios, y esta serie se intercala entre los bornes V y IV (figura 96). Se suprimen todas las clavijas del aparato menos la de resistencia 1 ohmio, de manera que la resistencia entre II y IV a través del galvanómetro es de 1000 ohmios.

Cerrando el interruptor entre II y v y observando la desviación P obtenida en el miliamperímetro, cuando x forma parte del circuito y la Q obtenida cuando se suprime x , tendremos

$$P = \frac{E}{1000 + x} \qquad \text{y} \qquad Q = \frac{E}{1000}$$

De estas dos ecuaciones se deduce

$$\frac{Q}{P} = 1 + \frac{x}{1000}$$

de donde

$$x = 1000 \left(\frac{Q}{P} - 1 \right) \text{ohmios}$$

La mayor desviación que puede obtenerse en el miliamperímetro es $Q = 150$ y la menor que

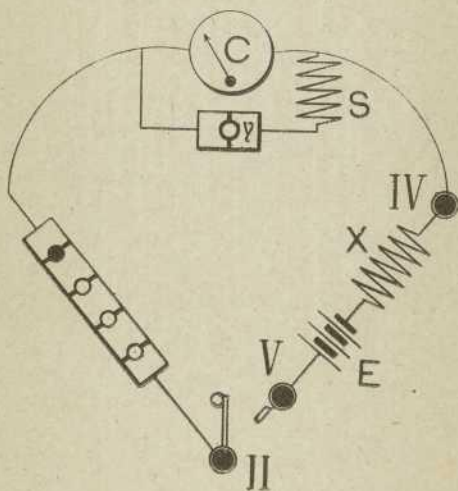


Fig. 96

puede observarse es $P = 0'1$. Por lo tanto, la mayor resistencia que puede medirse con este aparato será

$$x_{\text{máx.}} = 1000 \left(\frac{150}{0'1} - 1 \right) = 1499000$$

es decir, más de un megohmio.

Medida de tensiones.— Los puntos entre los cuales debe medirse la tensión se unen a los bornes II y IV (fig. 97). Se quitan todas las clavijas

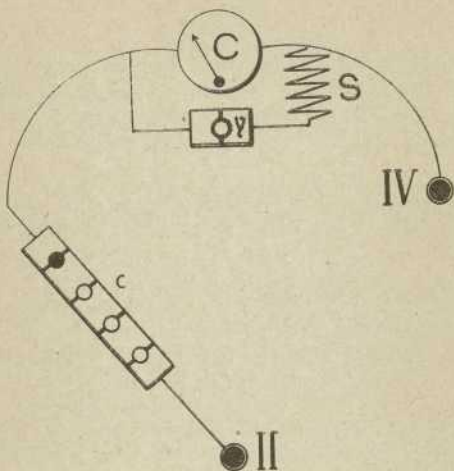


Fig. 97

menos la de la resistencia I y se mide la desviación Q de la aguja.

Siendo miliamperímetro el aparato, tendremos

$$Q = 1000 \frac{E}{c + I} \quad \text{o} \quad E = \frac{c + I}{1000} Q.$$

Dando a c los valores 999, 99, 9, ó cero, el coeficiente de la fórmula anterior tomará los valores 1, 0'1, 0'01, 0'001 y las 150 divisiones del aparato nos permitirán medir tensiones de 150, 15, 1'5 y 0'15 voltios.

Para mayores tensiones puede emplearse un reductor de resistencia R y conservando $c = 999$, tendremos

$$E = \frac{1000 + R}{1000} Q.$$

Con un reductor de 1000 ohmios cada división valdrá dos voltios y podremos medir hasta 300.

Con reductor de 4000 ohmios, cada división representará cinco voltios, y podremos medir hasta 750.

Por fin, con reductor de 9000, cada división representará diez voltios y podremos medir hasta 1500.

Medida de intensidades. — Si en el mismo montaje de la figura 97 suprimimos todas las resistencias de c , entre II y IV, tendremos solamente un ohmio, que es la resistencia del galvanómetro. El aparato funcionará como miliamperímetro, cada división representará un miliamperio, y las 150 divisiones nos permitirán medir una corriente de 0'15 amperios.

Entre los bornes II y IV puede montarse un shunt, y según el poder multiplicador del shunt podremos medir corrientes más o menos grandes.

Con un shunt de poder multiplicador diez, cada división representará 0'01 amperios y podremos medir hasta 1'5.

Con un shunt de poder multiplicador cien, cada división representará 0'1 amperios y podremos medir hasta 15.

Con un shunt de poder multiplicador mil, cada división representará 1 amperio y podremos medir hasta 150.

La casa Siemens construye shunts de manganina, que permiten medir intensidades hasta de 3000 amperios.

CAPÍTULO V

MEDIDA DE CAPACIDADES

Método de comparación.— Para comparar las capacidades de dos condensadores, bastará cargarlos sucesivamente con una misma pila y descargarlos en seguida sobre un mismo galvanómetro balístico. Estos galvanómetros, como hemos detallado en el capítulo I, sirven para medir descargas instantáneas y la cantidad de electricidad que los atraviesa resulta proporcional al seno de la semidesviación.

Siendo Q y Q' las cargas absorbidas por los condensadores; C y C' sus capacidades relativas, y α , α' las desviaciones que producen descargando sobre el galvanómetro balístico, se cumple la proporción

$$\frac{Q}{Q'} = \frac{C}{C'} = \frac{\text{sen } \alpha/2}{\text{sen } \alpha'/2}$$

Por lo tanto, conociendo α , α' y C' será fácil conocer C .

Si los ángulos observados en el balístico, son pequeños, podrá tomarse la fórmula aproximada

$$\frac{C}{C'} = \frac{\alpha}{\alpha'}$$

La descarga de un condensador sobre el galvanómetro ha de ser inmediatamente después de

la carga. Si entre ambas maniobras transcurre algún tiempo, es muy probable que se pierda parte de la carga.

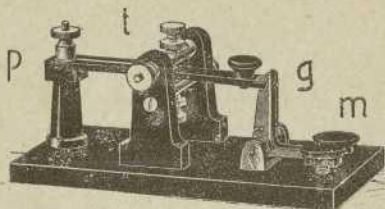


Fig. 98

La rapidez de las comunicaciones se consigue mediante *llaves de descarga*, como la representada en la figura 98. Una palanca p , fija en uno de sus extremos, puede oscilar entre dos tope fijos t ; pero

su muelle le obliga a apoyarse constantemente en el tope superior. Obligada a descender hasta el tope inferior o a permanecer sin tocar ni a uno, ni a otro, queda prisionera de uno de dos gatillos g en que terminan las palancas angulares m .



Fig. 99

Si la palanca de contactos se mantiene apoyada sobre el inferior por la acción del gatillo correspondiente, al oprimir su mango pasará rápidamente la palanca de un contacto a otro. Este es el objeto de las llaves de descarga.

Para la comparación se emplean condensadores especiales muy bien calibrados y que me-

diante un juego de clavijas permiten disponer de distintas capacidades. La figura 99 representa un condensador de esta clase, construído por la casa Carpentier, de París.

Método de Faraday.— Para aplicar el método de comparación, puede adoptarse también la disposición representada esquemáticamente por la figura 100.

Poniendo el conmutador *M* en la posición 1, se cargará la capacidad *C* y pasando a la posición

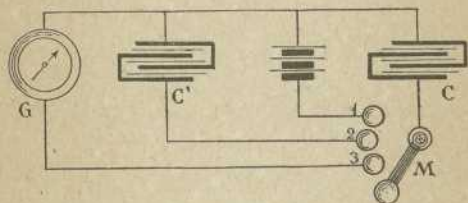


Fig. 100

3, se descargará sobre el balístico *G* y produce una desviación α .

Cargando nuevamente *C*, con la posición 1, se lleva el conmutador *M* a la posición 2, para repartir la carga entre las capacidades *C* y *C'*, y pasando luego a la posición 3, se descarga el sobrante de *C* sobre el galvanómetro, en el que observaremos una desviación α' .

Estableciendo la proporción entre capacidades y desviaciones, tendremos

$$\frac{C}{C+C'} = \frac{\alpha'}{\alpha}$$

haciendo el producto de medios igual al de extremos, resulta

$$C\alpha = C'\alpha' + C'\alpha'$$

y despejando C , tendremos

$$C = \frac{C'\alpha'}{\alpha - \alpha'}$$

Método de Gott.—Se forma un puente de Wheatstone (fig. 101), poniendo en dos de sus

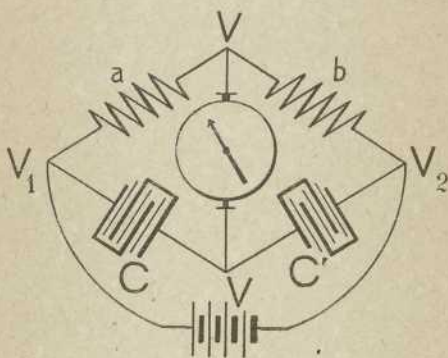


Fig. 101

brazos, resistencias variables a , b , y en los otros dos, las capacidades C , C' que se quieren comparar.

Se tantean las resistencias a y b , hasta conseguir que el galvanómetro no acuse corriente, y en este caso puede asegurarse que sus extremos están al mismo potencial V .

La igualdad de intensidades en los brazos a y b nos dará

$$\frac{V_1 - V}{a} = \frac{V - V_2}{b}$$

y la igualdad de cargas en los otros brazos

$$C(V_1 - V) = C'(V - V_2)$$

Dividiendo esta igualdad por la anterior se tiene

$$Ca = C'b$$

de donde

$$C = C' \frac{b}{a}$$

CAPÍTULO VI

MEDIDA DE LA POTENCIA ELÉCTRICA

Potencia de una corriente continua. — Definida la potencia eléctrica como el producto de la tensión en voltios por la corriente en amperios, cuando esta corriente es continua, *será fácil medir indirectamente los vatios, mediante un voltímetro y un amperímetro, sin más que multiplicar las indicaciones de los dos aparatos.*

Vatímetros. — Para apreciar la potencia con una sola medición, se construyen los aparatos denomi-

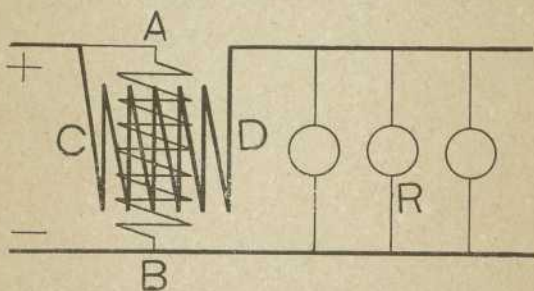


Fig. 102

nados vatímetros. Son del tipo electrodinamómetro y están constituidos por dos carretes, uno fijo y otro movable (fig. 102). El carrete movable AB

es muy resistente, bien por tener muchas vueltas de hilo fino, o bien por llevar una resistencia adicional, y *se monta en derivación entre los conductores de la canalización*. Siendo su resistencia muy superior a la del resto del circuito y estando montada en derivación, tendremos como en los voltímetros, que la intensidad i que circula por ella, será solamente proporcional a la diferencia de tensión entre los puntos A y B .

$$i = KV$$

Este carrete recibe el nombre de *carrete voltimétrico*, y está encargado de notar los voltios del circuito.

El carrete fijo CD es muy poco resistente, de hilo grueso y pocas vueltas. *Montado en serie en uno de los conductores*, resultará atravesado por toda la intensidad I que circula por la instalación. Este carrete recibe el nombre de *carrete amperimétrico*, y está influido por los amperios consumidos por los receptores.

La energía mutua de los dos carretes será como en el caso de los electrodinamómetros

$$\mathcal{N}iI = \mathcal{N}KVI = aW$$

siendo a la constante del aparato.

Los dos carretes, cuando uno de ellos está sin corriente, permanecen perpendiculares y al funcionar, el carrete movable girará un ángulo θ que será proporcional a la potencia consumida en el circuito.

$$\theta = aW$$

La constante a , propia de cada aparato, puede determinarse mediante un experimento preliminar. Representa la desviación producida por un vatio.

La figura 103 representa un vatímetro de la casa Weston. Los dos bornes de la parte superior son los extremos del carrete voltimétrico, y los

bornes gruesos que salen por el lado del aparato, corresponden al carrito amperimétrico. El botón

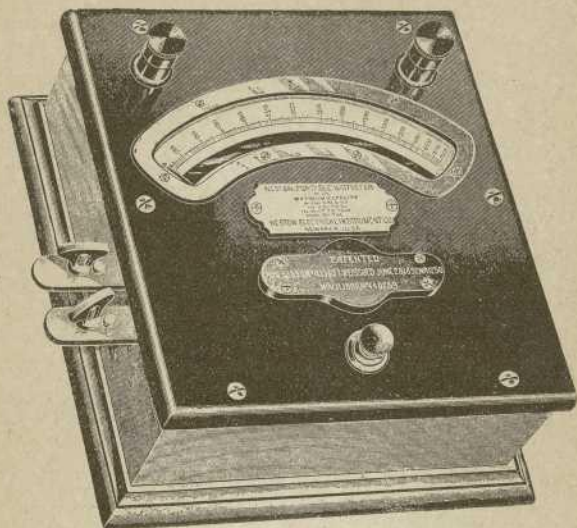


Fig. 103

de la parte inferior de la cubierta, sirve para graduar el aparato a cero.

Potencia de una corriente alternativa. — La potencia de una corriente alternativa monofásica, es

$$W = VI \cos \varphi$$

y para una corriente trifásica

$$W = \sqrt{3} VI \cos \varphi$$

Si la autoinducción del circuito es constante o nula, el valor de $\cos \varphi$ será constante, y entonces

será fácil medir la potencia, midiendo, con voltímetro y amperímetro, la tensión V y la corriente I , y con un fasímetro, el desfase entre ellas o el factor de potencia $\cos \varphi$.

Si la autoinducción es variable, podremos medir la potencia eficaz en cada momento, mediante un vatímetro como el que acabamos de estudiar. La acción mutua de los dos carretes no cambiará aun cuando cambien de signo las dos intensidades a la vez.

Las conexiones del vatímetro, producen siempre un error en sus medidas. Si el extremo A del carrete voltimétrico se empalma a línea antes que el amperimétrico, como está en la figura 102, el aparato acusa una tensión que los receptores no utilizan, puesto que parte de ella se consume en el carrete CD . Si el extremo A se empalma después del carrete amperimétrico, el aparato acusa la corriente consumida por AB .

En mediciones industriales, no tiene importancia este error, y se desprecia; pero en mediciones de laboratorio debe corregirse dicho error, para lo cual se empalma el extremo A después del carrete amperimétrico, y de las indicaciones del vatímetro se descuentan los vatios dados por la fórmula

$$W = \frac{V^2}{r}$$

En la cual V es la diferencia de tensión entre A y B , y r la resistencia del carrete voltimétrico.

Cálculo de la potencia en un circuito con reactancia. — Método de los voltímetros. — Ayrton y Sumpner han ideado un método para determinar la potencia gastada en un circuito con autoinducción, mediante tres voltímetros y una resistencia no inductiva.

Sea R_1 la resistencia inductiva de que se trata.

Pongamos en serie con ella otra resistencia R_2 sin reactancia y sea V la tensión eficaz aplicada a la serie $R_1 + R_2$; V_1 y V_2 las tensiones consumidas por cada uno de los sumandos.

Las tensiones V_2 y V_1 estarán desfasadas un ángulo φ , por efecto de la reactancia R_1 , y la V , que será la resultante de las dos, formará con ellas un triángulo oblicuángulo, cuyos lados V , V_1 y V_2 , cumplen la relación

$$V^2 = V_1^2 + V_2^2 + 2V_1V_2 \cos \varphi$$

de donde

$$\cos \varphi = \frac{V^2 - V_1^2 - V_2^2}{2V_1V_2} \quad [1]$$

La corriente común a las dos resistencias, la encontraremos por la ley de Ohm aplicada en la resistencia no inductiva

$$I = \frac{V_2}{R_2} \quad [2]$$

Y la potencia eficaz consumida por la reactancia será

$$W = V_1 I \cos \varphi$$

Substituyendo en esta fórmula los valores de I , y $\cos \varphi$, hallados en [2] y [1], resulta

$$W = \frac{V_1V_2}{R_2} \frac{V^2 - V_1^2 - V_2^2}{2V_1V_2} = \frac{V^2 - V_1^2 - V_2^2}{2R_2}$$

Método de los amperímetros. — Si no se dispone de tensión suficiente para aplicar el método anterior, puede emplearse el siguiente procedimiento debido a Fleming.

Las resistencias con reactancia R_1 y sin reactancia R_2 se unen en paralela, se someten a una tensión V y se miden las corrientes eficaces, total I , y parciales I_1 e I_2 .

Las corrientes I_1 e I_2 estarán desfasadas un ángulo φ , por efecto de la reactancia R_1 .

En el triángulo formado por los tres vectores representativos de I , I_1 , I_2 , se tiene

$$I^2 = I_1^2 + I_2^2 + 2I_1I_2 \cos \varphi$$

de donde

$$\cos \varphi = \frac{I^2 - I_1^2 - I_2^2}{2I_1I_2} \quad [1]$$

La tensión común a las dos resistencias la encontraremos aplicando la ley de Ohm en la resistencia no inductiva R_2

$$V = R_2I_2 \quad [2]$$

La potencia eficaz consumida por la reactancia R_1 será

$$W = VI_1 \cos \varphi$$

y substituyendo los valores de V y $\cos \varphi$ dados por las fórmulas [1] y [2], tendremos

$$W = R_2I_2I_1 \frac{I^2 - I_1^2 - I_2^2}{2I_2I_1} = R_2 \frac{I^2 - I_1^2 - I_2^2}{2}$$

Instalación de vatímetros. — Sistema trifásico equilibrado, sin neutro. — Mr. Blondlot ha ideado un vatímetro, que permite medir la potencia total consumida en un sistema trifásico equilibrado. El carrete amperimétrico está dividido en dos, completamente independientes y devanados en sentido contrario, que se intercalan en dos conductores de los tres que tiene el sistema. El carrete voltimétrico se deriva entre los mismos conductores que contienen los carretes amperimétricos.

Sistema trifásico equilibrado, con neutro. — Si un sistema trifásico con neutro tiene sus puentes perfectamente equilibrados, conoceremos la potencia total

consumida, midiendo la de uno de los puentes y triplicando las indicaciones.

Para ello intercalaremos el carrete amperimétrico, *en serie* en uno de los conductores extremos, y el voltimétrico, *en derivación* entre este mismo conductor y el neutro.

Este caso se presentará rara vez en la práctica, ya que el empleo de neutro hace suponer que los puentes no están equilibrados.

Creación de un punto neutro artificial. — Si el sistema trifásico está equilibrado, sin neutro, aun

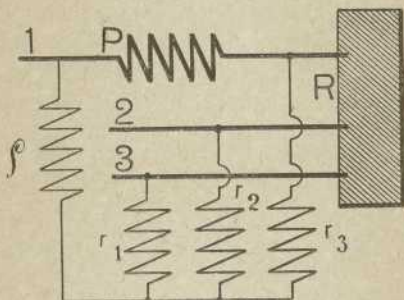


Fig. 104

puede medirse la potencia mediante un solo vatímetro ordinario, creando un punto neutro artificial.

Para ello se reúnen tres resistencias r_1 r_2 r_3 (figura 104), apoyadas cada una en uno de los conductores, como indica la figura, y se instala el vatímetro intercalando su carrete amperimétrico P en uno de los conductores, y derivando su carrete voltimétrico ϕ , entre el mismo conductor y el punto neutro.

Las tres resistencias que unen los conductores al punto neutro deben ser exactamente iguales

para que el punto sea perfectamente neutro, luego debe tenerse

$$r_1 = r_2 = \frac{\rho r_3}{\rho + r_3}$$

Sistema trifásico no equilibrado. — Cuando los tres puentes de un sistema trifásico no están equilibrados, puede medirse la potencia total consumida, midiendo la de cada puente mediante un vatímetro y sumando los resultados.

$$W = V_1 I_1 + V_2 I_2 + V_3 I_3$$

El número de vatímetros puede reducirse a dos. En efecto, hemos visto en el tomo II, pág. 85, que en un sistema polifásico completo, la suma de intensidades, es, en cualquier momento, nula, luego tendremos

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

o bien

$$I_3 = -I_1 - I_2$$

con lo cual el valor de W se transforma en

$$W = V_1 I_1 + V_2 I_2 - V_3 I_1 - V_3 I_2$$

o bien

$$W = I_1 (V_1 - V_3) + I_2 (V_2 - V_3)$$

Montaremos, por tanto, dos vatímetros, intercalando sus carretes amperimétricos en los conductores 1 y 2, derivando sus carretes voltimétricos entre los 1 — 3 y 2 — 3. La suma de las indicaciones de los dos vatímetros será la potencia total consumida.

Determinación del ángulo φ en un circuito. — El montaje de los dos vatímetros permite calcular el ángulo φ mediante la tangente dada por la fórmula

$$\text{tang } \varphi = \sqrt{3} \frac{W_B - W_A}{W_B + W_A}$$

en la que W_B y W_A son las indicaciones de los dos vatímetros.

CAPÍTULO VII

MEDIDAS DE LA DIFERENCIA DE FASE Y DE LA FRECUENCIA

Método de los vatímetros. — Para medir la diferencia de fase entre la tensión y la intensidad, existente en un circuito de utilización cualquiera, bastará medir los *vatios* mediante un vatímetro y compararlos con los *voltioamperios* medidos con voltímetro y amperímetro. Las fórmulas de la potencia, que para corriente monofásica, es

$$W = VI \cos \varphi$$

y para corrientes trifásicas, es

$$W = \sqrt{3} VI \cos \varphi$$

nos permiten buscar el valor del factor de potencia, que resulta; para corriente monofásica

$$\cos \varphi = \frac{W}{VI}$$

y para corrientes trifásicas

$$\cos \varphi = \frac{W}{\sqrt{3} VI} \quad [1]$$

EJEMPLO. *Un motor asincrónico trifásico está funcionando a 220 voltios, consume 34 amperios y*

11100 vatios. Se desea saber a qué factor de potencia está funcionando.

La fórmula [I] nos dará

$$\cos \varphi = \frac{11100}{\sqrt{3} \times 220 \times 34} = 0'86$$

Cuando se trata de corrientes trifásicas, y se mide su potencia mediante dos vatímetros instalados como se dijo en el capítulo VI, puede conocerse el desfase mediante la fórmula

$$\text{tang } \varphi = \sqrt{3} \frac{W_B - W_A}{W_A + W_B}$$

Método de los electrodinamómetros.— Puede medirse el desfase entre dos corrientes I e I' , mediante tres electrodinamómetros D , D' , D'' . El D , es recorrido por la corriente I ; el D' , por la I' , y el D'' tiene un carrito recorrido por I y otro por I' , luego su indicación corresponderá a $II' \cos \varphi$.

Dividiendo la indicación del tercero por el producto de las indicaciones de primero y segundo, tendremos

$$\frac{II' \cos \varphi}{II'} = \cos \varphi$$

como se deseaba.

Fasímetro Brüger.— Esencialmente se compone este aparato de dos carretes AA' (fig. 105), que recorridos por la corriente que se estudia I_A

$$I_A = I_0 \text{ sen } (at - \varphi)$$

crean un campo alternativo y fijo.

Sometido a la acción de este campo existe un sistema de dos carretes B y C , formando siempre

entre sí ángulo recto, pero pudiendo girar alrededor de su diámetro común.

Estos carretes son voltimétricos, es decir, derivados en la canalización. Uno de ellos, el *B*, con una resistencia sin reactividad y el otro, con una reactividad que produzca en la corriente derivada un desfase de 90° , de manera que las corrientes voltimétricas que atraviesan estos carretes, tienen iguales valores eficaces $I_B = I_C$ pero están des-

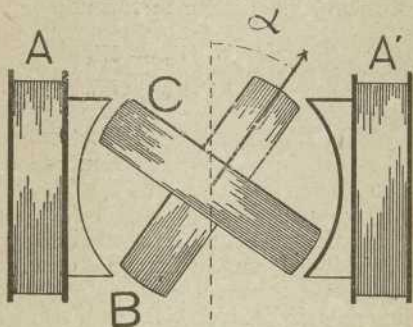


Fig. 105

fasadas respecto a la corriente amperimétrica I_A , los ángulos φ y $\varphi + 90^\circ$.

Los carretes *AA'* actuando sobre el *B*, constituyen un vatímetro, y el carrete móvil *B*, tiende a girar para colocarse paralelo a los carretes *AA'*.

Del mismo modo, los carretes *AA'*, y *C*, forman otro vatímetro, en el cual el carrete *C* debería girar hasta quedar paralelo a los carretes *AA'*.

Las acciones de *AA'* sobre *B* y *C* son de signo contrario, y se consigue el equilibrio del sistema móvil, cuando el ángulo α girado por éste es igual en valor absoluto al ángulo φ de desfase entre la tensión y la corriente.

El eje de los carretes móviles lleva un índice que se mueve paralelo a un limbo dividido en grados, a partir de cero y en ambos sentidos.

La figura 106 representa un aparato portátil construido, con arreglo a la teoría anterior, por la casa Hartmann Braun.

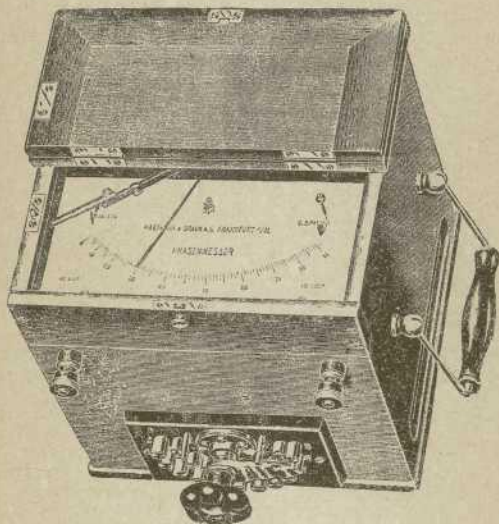


Fig. 106

En la parte anterior de la figura se ve un conmutador de manija, cuyo objeto es variar la reactancia unida a una de los carretes móviles, según sea la frecuencia de la corriente que se va a manejar. Un mismo aparato puede emplearse con frecuencias que varíen de 40 a 60 períodos.

Fasímetro Dobrowolsky.— Este aparato está constituido por un disco metálico *D*, que puede

girar alrededor de su centro (fig. 107), venciendo la resistencia de un muelle en espiral, y llevando una aguja indicadora *A*. El disco se mueve en el interior de dos carretes; uno de ellos, *BB'* amperimétrico y el otro *CC'* voltimétrico, luego los

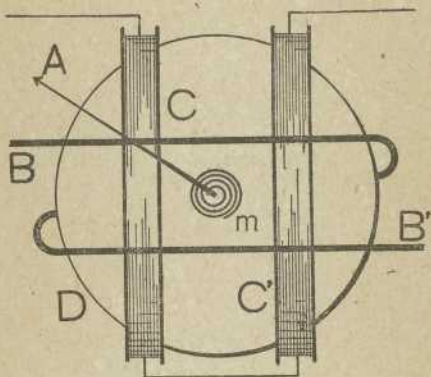


Fig. 107

campos electromagnéticos que crean serán de la forma

$$x = H' \text{ sen } at$$

$$y = H'' \text{ sen } (at - \varphi)$$

Estas dos intensidades, dan lugar a un campo giratorio, cuya intensidad varía como el radio vector de una elipse, según vimos en el tomo II, capítulo V, y el disco metálico será arrastrado con un esfuerzo proporcional $\cos^2 \varphi$.

El aparato se gradúa empíricamente para una tensión y una frecuencia dadas, leyéndose directamente $\text{sen } \varphi$.

Frecuencímetros. — La frecuencia de la corriente producida por un alternador es

$$f = n\phi$$

siendo n el número de revoluciones por segundo y ϕ el número de pares de polos.

Si n expresa el número de revoluciones por minuto, se tiene la frecuencia

$$f = \frac{n\phi}{60}$$

En una máquina cualquiera es fácil encontrar n mediante un contador de vueltas y calcular por lo tanto la frecuencia.

Cuando se desea medir la frecuencia de una corriente lejos del generador que la produce, el procedimiento anterior es inaplicable y se necesita recurrir a aparatos especiales, llamados frecuencímetros, que nos den en cualquier tiempo y lugar, el número de períodos de una corriente.

Frecuencímetro Frahm. — El fundamento de este aparato es un fenómeno de resonancia acústica.

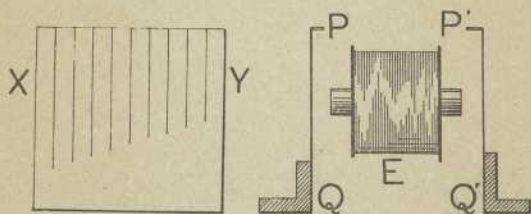


Fig. 103

Se dispone una serie de lengüetas de acero, de dimensiones variadas XY (fig. 103), de manera

que sus períodos propios de vibración correspondan a las frecuencias que el aparato debe medir.

Estas lengüetas, vistas de canto en PQ , llevan en su extremo libre un apéndice P perpendicular a su longitud, pintado de blanco y que es lo único que se ve en la parte exterior del aparato.

En la figura 109 se ven dos series de estos apéndices, I, I y II, II correspondientes a otras tantas lengüetas vibrantes.

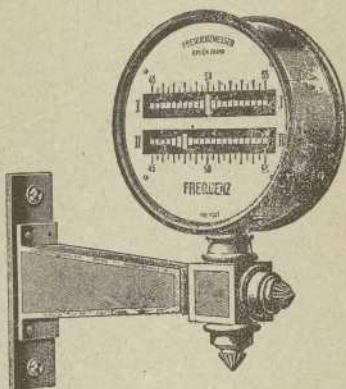


Fig. 109

Frente a las láminas vibrantes $PQ, P'Q'$, existe un electroimán E , cuyo núcleo es aplanado y con una longitud igual a XY para influir simultáneamente en todas ellas (fig. 108).

Este electroimán, alimentado por la corriente que se quiere medir, produce un campo alternativo y fijo, que tiende a poner todas las lengüetas en vibración, pero que sólo lo consigue en aquella cuyo período propio sea igual al de la corriente que se estudia.

Cuando el aparato funciona (fig. 109), se nota

vibración en dos o tres lengüetas consecutivas, pero la frecuencia debe entenderse que corresponde a la de máxima vibración. En la escala *I*, *I* leeremos la frecuencia 50 y en la *II*, *II*, leeremos 48. Este modelo está construido por la casa Siemens-Halske.

Frecuencímetro Ferrié-Carpentier. — Entre los puntos *M* y *N* (fig. 110), se establece una diferen-

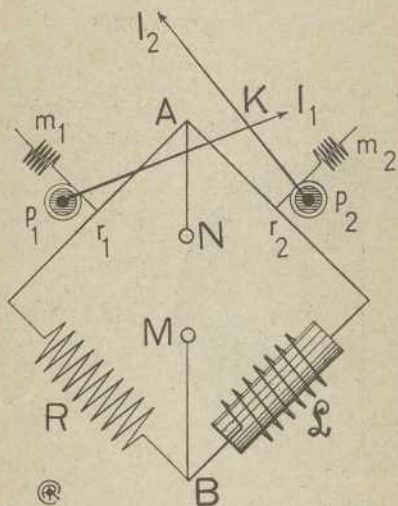


Fig. 110

cia de potencial alternativa, que da lugar a dos corrientes, circulando una por el hilo r_1 y la resistencia R y otra por el hilo r_2 y la autoinducción \mathcal{L} .

Los hilos r_1 y r_2 fijos por sus extremos, constituyen dos pequeños amperímetros térmicos, como el

estudiado en el capítulo II, siendo $p_1 p_2$ las poleas, $m_1 m_2$ los muelles tensores, e $I_1 I_2$ las agujas indicadoras.

Las corrientes que circulan por los dos circuitos $r_1 R$ y $r_2 \mathcal{L}$ serán

$$I_1 = \frac{V}{r_1 + R} \quad I_2 = \frac{V}{\sqrt{r_2^2 + (2\pi/\mathcal{L})^2}}$$

cuya relación es

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\sqrt{r_2^2 + (2\pi/\mathcal{L})^2}}{r_1 + R}$$

Siendo constantes $r_1 r_2 R$ y \mathcal{L} la relación anterior depende solamente de la frecuencia f .

Influyendo la frecuencia en la relación de intensidades, se gradúa el frecuencímetro Ferrié para leer la frecuencia en el punto K de intersección de los dos índices.

En la figura III se ve un modelo de frecuencímetro Ferrié, construído por la casa Carpentier, para instalar en un cuadro

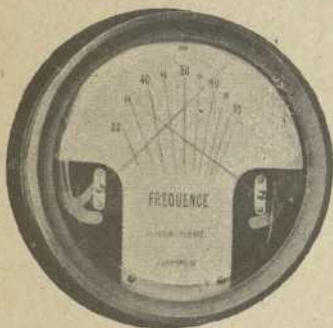


Fig. III

con los amperímetros y voltímetros. En él se pueden apreciar frecuencias comprendidas entre los 30 y los 75 períodos.

CAPÍTULO VIII

MEDIDA DE LA INDUCCIÓN

Carretes de inducción. — Para medir el coeficiente de autoinducción de un circuito se compara éste con la autoinducción de carretes calibrados, de coeficiente \mathcal{L} conocido, que se construyen expresamente para servir de tipo de comparación, como las cajas de resistencia para la medición de resistencias.

Los carretes cuya autoinducción se emplea como tipo de comparación para las mediciones, se devanan sobre núcleos aislantes de pizarra o mármol, para evitar las corrientes de Foucault, y se calibran cuidadosamente.

Para tener distintos valores de \mathcal{L} en un solo aparato, se construyen *patrones de autoinducción variable*, constituidos por dos carretes circulares (fig. 112), uno dentro de otro y cuyos devanados van unidos en serie. El exterior es fijo y el interior puede girar alrededor de su diámetro horizontal.

Cuando los dos carretes estén en un mismo plano y sus devanados en el mismo sentido, la autoinducción del conjunto será máxima. La autoinducción decrecerá a medida que formen un ángulo mayor y llegará a ser mínima cuando el ángulo llegue a 180° .

El eje del carrete movable lleva un índice que recorre una escala graduada en henrios o en grados de círculo.

El modelo representado en la figura, está construido en la casa Carpentier. Tiene una resistencia

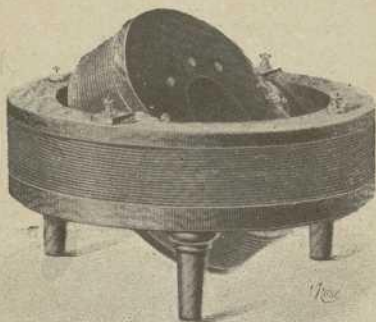


Fig. 112. — Carrete de autoinducción regulable

total de 8'63 ohmios y una autoinducción de 0'269 henrios el carrete fijo y 0'177 el movable. Cuando la posición relativa de los carretes es de 0°, 90°, y 180°, la autoinducción del conjunto alcanza 0'228, 0'446 y 0'664 henrios respectivamente.

Cálculo del coeficiente de autoinducción. — En el tomo I, pág. 159, hemos hallado como expresión del coeficiente de autoinducción la fórmula

$$\mathcal{L} = \frac{4\pi m^2 \mu s}{l}$$

En la cual m , representa el número de espiras del carrete; y μ , s , l , el coeficiente de permeabilidad, sección y longitud del núcleo.

Esta fórmula nos permitirá calcular \mathcal{L} cuando conozcamos μ , y las dimensiones del carrete.

Si la determinación de la permeabilidad es difícil, se recurre, para la medición del coeficiente de autoinducción, a alguno de los procedimientos indirectos que estudiamos a continuación.

Método del fasímetro. — Midiendo con un fasímetro el desfase entre la tensión aplicada a un carrete y la corriente que circula por él, podremos calcular el coeficiente de autoinducción, puesto que

$$\text{tang } \varphi = \frac{a\mathcal{L}}{r}$$

de donde

$$\mathcal{L} = \frac{r}{a} \text{tang } \varphi = \frac{r}{2\pi f} \text{tang } \varphi$$

(Recordemos que $a = 2\pi f$, como se vió en el tomo II, pág. 25).

Método de las constantes eficaces. — Para medir el coeficiente de autoinducción de un carrete, hagamos circular por él una corriente alternativa, cuyas constantes eficaces podamos medir. Entre estas constantes, existe la relación

$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + a^2\mathcal{L}^2}}$$

según hemos visto en el tomo II, pág. 52, y resolviendo la ecuación respecto a \mathcal{L} tendremos:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{V^2}{I^2} - R^2}$$

Bastará substituir en esta fórmula los valores V , I , R , que ya sabemos medir, para obtener el valor de \mathcal{L} en henrios.

Método de los voltímetros. — Puede procederse de otro modo para evitar la medición de I , midiendo únicamente diferencias de potencial o de tensión.

En serie con el carrete, que se ensaya, montemos una resistencia R' , sin autoinducción, y hagamos circular por el conjunto una corriente I . Esta corriente, común a todo el circuito, producirá una caída distinta en cada parte, que serán:

Para el carrete

$$V = I\sqrt{R^2 + a^2\Omega^2} \quad [1]$$

Para la resistencia

$$V' = IR' \quad [2]$$

Dividiendo miembro a miembro las igualdades [1] y [2], resulta

$$\frac{V}{V'} = \frac{\sqrt{R^2 + a^2\Omega^2}}{R'}$$

de donde

$$\Omega = \frac{1}{a} \sqrt{\left(\frac{V}{V'}\right)^2 R'^2 - R^2}$$

Bastará, pues, medir, con un voltímetro, la diferencia de potenciales V' , V , en los bornes de resistencia y carrete; y conocer las resistencias R , R' , de carrete y resistencia, para determinar Ω .

Método de galvanómetro diferencial. — Cuando un galvanómetro tiene el devanado dividido en dos partes iguales, puede funcionar como diferencial haciendo circular por sus dos devanados distintas corrientes. El ángulo de desviación del galvanómetro será proporcional a la diferencia de corrientes, y cuando la diferencia se anula no habrá desviación en el aparato.

Puede medirse el coeficiente de autoinducción de un carrete, empleando un galvanómetro diferencial y haciendo el montaje y las operaciones que vamos a detallar.

Hagamos comunicar uno de los circuitos del galvanómetro diferencial (fig. 113), con una capacidad variable C , shuntada por la resistencia r , y en serie con la autoinducción L , cuyo coeficiente

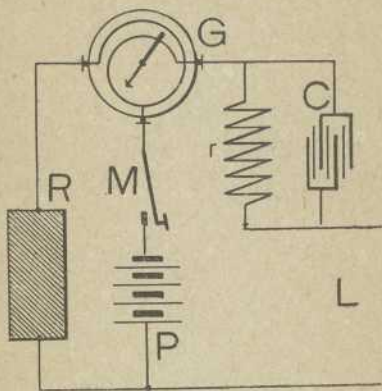


Fig. 113

quiere medirse. El otro circuito se hace comunicar con un reóstato variable R .

Cerrando el interruptor M , durante algunos segundos, para que se establezca el régimen permanente de la pila, y actuando luego sobre el reóstato R , se podrá equilibrar el sistema de ambos circuitos, en régimen normal de corriente.

Conseguido el equilibrio, se abre y se cierra el interruptor M , con bastante frecuencia para provocar períodos variables en el circuito derivado rCL .

El galvanómetro acusará nuevamente un desequilibrio en sus circuitos, que trataremos de restablecer actuando sobre la resistencia r . Cuando

los movimientos del interruptor no tengan efecto alguno sobre el galvanómetro, se cumplirá la relación

$$\mathcal{L} = c \cdot r^2$$

según vimos en el tomo II, pág. 67.

Método de Maxwell o de comparación. — Formemos un puente de Wheatstone poniendo en r_2 y r_4 resistencias no inductivas (fig. 114), en

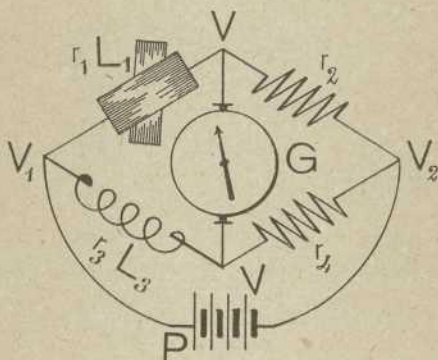


Fig. 114

$r_1 L_1$ el carrete de autoinducción variable, estudiado al principio de este capítulo, y en $r_3 L_3$ la resistencia inductiva que queremos medir.

Equilibrando el puente para el régimen permanente de la corriente, se tiene

$$r_1 r_4 = r_2 r_3 \quad [I]$$

Conseguido el equilibrio, abramos y cerremos rápidamente el interruptor de pila, con objeto de tener su corriente en régimen variable. Notándose entonces los efectos de autoinducción,

variemos la del patrón $r_1 L_1$ hasta conseguir nuevamente la inmovilidad del galvanómetro. La igualdad de intensidades en los brazos 1 y 2, como en los 3 y 4 nos da

$$\frac{V_1 - V}{\sqrt{r_2^2 + a^2 \Omega_3^2}} = \frac{V - V_2}{r_4}, \quad \frac{V_1 - V}{\sqrt{r_1^2 + a^2 \Omega_1^2}} = \frac{V - V_2}{r_2}$$

de donde, elevando al cuadrado estas dos proporciones y dividiendo una por otra, resulta

$$\frac{r_1^2 + a^2 \Omega_1^2}{r_3^2 + a^2 \Omega_3^2} = \frac{r_2^2}{r_4^2}$$

quitando denominadores y teniendo en cuenta la relación [I]

$$\Omega_3 = \frac{r_3 \Omega_1}{r_2}$$

Secómetro. — Se aumenta notablemente la exactitud del método anterior, accionando el galvanómetro y la pila mediante un conmutador especial llamado secómetro, ideado por Ayrton y Perry, que, ligeramente variado, representamos en la figura 115.

Sobre un disco aislador, que puede girar alrededor de su centro, se hallan incrustadas unas placas metálicas de la forma especial que indica el dibujo, y sobre ellas se apoyan ocho muelles de acero, fijos en el borde del aparato. Los PP' comunican con los polos de la pila; los GG' con los bornes del galvanómetro y los VVV_1, V_2 con los vértices del puente que llevan estas letras en la figura 115.

Girando de un modo continuo el disco que contiene las chapas, las exteriores cierran, abren e invierten el circuito de la pila y las anteriores el del galvanómetro.

La chapa central, recta, tiene por objeto poner en corto circuito el galvanómetro después de cada descarga sufrida.

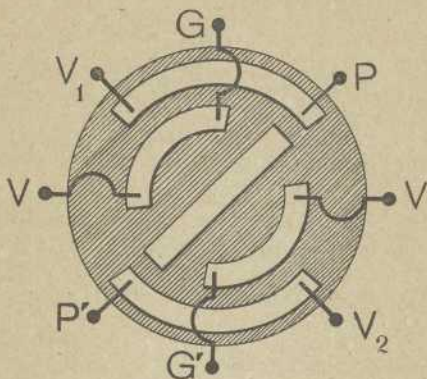


Fig. 115

Se construyen modelos, en los cuales el disco gira rápidamente mediante un aparato de relojería o un pequeño electromotor.

Medida del coeficiente de inducción mutua. —

En el tomo I, pág. 162, definimos el coeficiente de inducción mutua, como *medio proporcional entre los coeficientes de autoinducción de los circuitos que se influyen.*

El coeficiente de inducción mutua, de un circuito puede medirse por comparación o bien directamente.

Método de comparación. — Si se conoce el coeficiente de inducción mutua de un par de carretes, es fácil deducir el correspondiente a otro par. Para ello se construyen carretes tipos, de coeficiente perfectamente determinado.

Dispongamos el par conocido \mathcal{N} y el desconocido \mathcal{N}' como se indica en la figura 116, uniendo en serie sus primarios con un generador, una resistencia y un interruptor; y sus secundarios con resistencias r y r' variables, y un galvanómetro derivado entre ellos.

Arreglemos las resistencias de manera que al abrir y cerrar el interruptor, el galvanómetro

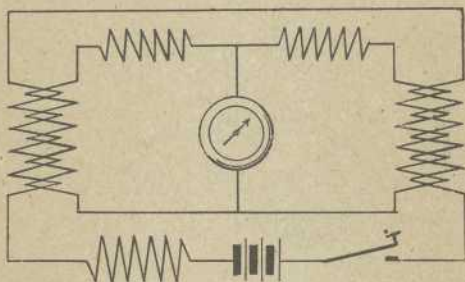


Fig. 116

no acuse descarga alguna y podremos asegurar que son iguales las corrientes inducidas en los dos secundarios, es decir, que las tensiones inducidas ($\mathcal{N}I$) y ($\mathcal{N}'I$) son proporcionales a las resistencias ($R + r$) y ($R' + r'$).

$$\frac{\mathcal{N}I}{\mathcal{N}'I} = \frac{R + r}{R' + r'}$$

de donde

$$\mathcal{N}' = \mathcal{N} \frac{R' + r'}{R + r}$$

Medida directa.— Tratemos de determinar el coeficiente de inducción mutua de dos carretes

concéntricos, suponiendo que de uno de ellos, el interior, por ejemplo, conocemos la resistencia r y la autoinducción Ω .

Conexionemos el carrete interior, conocido, a un puente de Wheatstone, como indica la figura 117, siendo los brazos a , b , c , resistencias no inductivas

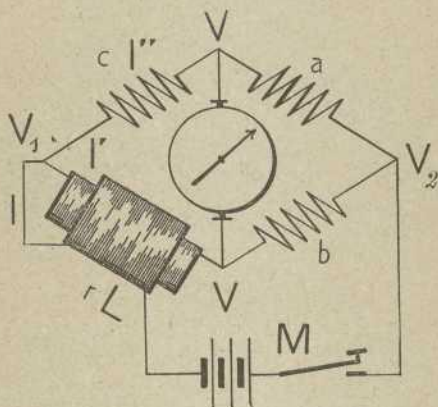


Fig. 117

y pongamos el segundo carrete entre el vértice V_1 y la pila.

Equilibremos el puente de manera que el galvanómetro no funcione ni en régimen permanente ni en régimen variable.

El equilibrio en régimen permanente nos autoriza a escribir.

$$I' = \frac{V_1 - V}{r} \quad I'' = \frac{V_1 - V}{r}$$

dividiendo una por otra, se tiene

$$\frac{I'}{I''} = \frac{c}{r}$$

y aplicando un conocido teorema aritmético que dice: *suma de antecedente y consecuente de la primera razón es a su antecedente, como suma de antecedente y consecuente de la segunda es al suyo*, resulta:

$$\frac{I' + I''}{I'} = \frac{c + r}{c}$$

pero $I' + I''$, es igual a la corriente total que circula por el carrete exterior, y substituyendo

$$\frac{I}{I'} = \frac{c + r}{c} \quad \text{o} \quad \frac{I'}{I} = \frac{c}{c + r}$$

Si el equilibrio no se destruye en régimen variable, es que el efecto de autoinducción del carrete interior $\frac{\mathcal{L}I'}{r}$, es igual al de inducción

mutua $\frac{\mathcal{M}I}{r}$ luego

$$\frac{\mathcal{L}I'}{r} = \frac{\mathcal{M}I}{r}$$

de donde

$$\mathcal{M} = \mathcal{L} \frac{I'}{I} = \mathcal{L} \frac{c}{c + r}$$

Para practicar este procedimiento, puede emplearse el *secómetro* estudiado en este mismo capítulo.

CAPÍTULO IX

MEDIDAS MAGNÉTICAS

Momento magnético de un imán e intensidad de un campo.—El momento magnético de un imán, que puede oscilar libremente en un campo, y la intensidad de este campo, están relacionados por la fórmula establecida en el tomo I, página 40.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\Omega}{\mathfrak{M}}} \quad \text{ó} \quad \mathfrak{M} = \frac{4\pi^2\Omega}{T^2} \quad [1]$$

de la cual podremos deducir \mathfrak{A} o \mathfrak{H} cuando conozcamos \mathfrak{H} o \mathfrak{A} y todas las demás cantidades que intervienen en ella.

Rueda de Fischer.—Si un disco metálico se hace girar rápidamente en el seno de un campo magnético, nace una fuerza electromotriz máxima, entre el eje y la periferia, representada en voltios por la fórmula (tomo II, pág. 22 y 155).

$$10^8 E_0 = \mathfrak{H}sa = \mathfrak{H}s \cdot 2\pi n$$

De aquí podemos deducir el valor de la intensidad del campo, siempre que midamos exactamente la tensión E_0 , la superficie s , y el número de revoluciones n .

La casa Hartmann construye ruedas de Fischer, de dimensiones apropiadas para dar 0'3 milivoltios en un campo de 100 gausios, que, por lo tanto, permite medir campos magnéticos de debilísimas intensidades.

Comparación de intensidades.— Para comparar las intensidades de dos puntos de un mismo campo magnético, basta medir con la mayor exactitud posible, el tiempo de oscilación de un mismo imán en los dos puntos que se estudian. Tendremos, de la fórmula [1]

$$\mathcal{H} = \frac{4\pi^2\Omega}{\mathcal{A}T^2} \quad \mathcal{H}' = \frac{4\pi^2\Omega}{\mathcal{A}T'^2}$$

y dividiendo una por otra

$$\frac{\mathcal{H}}{\mathcal{H}'} = \frac{T^2}{T'^2}$$

Inclinómetro de Weber.— Este aparato sirve para medir la componente horizontal del campo magnético terrestre.

Esencialmente se compone de un carrete circular que puede girar alrededor de uno de sus diámetros, teniendo este diámetro una inclinación perpendicular a la intensidad del campo magnético terrestre.

Los extremos del hilo que viste el carrete, comunican con un galvanómetro balístico.

Sean N el número de espiras del carrete; r , su resistencia; s , su sección, y B , el factor de reducción del galvanómetro.

La intensidad \mathcal{H} del campo magnético vendrá dada por la fórmula

$$\mathcal{H} = \frac{rB}{2sN} \operatorname{sen} \frac{\alpha}{2}$$

El aparato representado en la figura 118 es un inclinómetro Weber, tipo Mascart, construido por la casa Carpentier.

Tiene un círculo acimutal dividido en medios grados, con nonio que permite apreciar minutos,

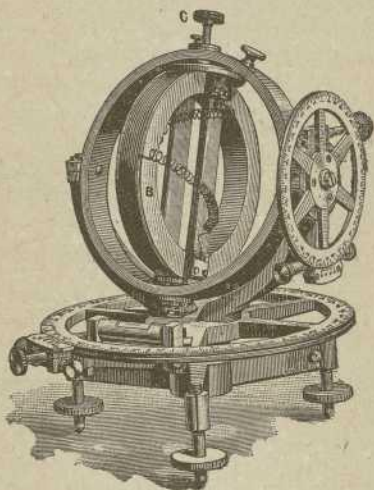


Fig. 118. — Inclinómetro de M. Mascart.

montado en un trípode de tornillos nivelantes. En el centro de este círculo lleva un eje vertical, alrededor del cual gira un semicírculo que soporta los ejes de un círculo completo. Este círculo puede tomar cualesquiera inclinación y orientación.

Dentro del círculo completo, se mueve el carrete que debe inducirse por el campo magnético terrestre. Como se ve, el eje de giro de este carrete puede ponerse siempre perpendicular a la dirección el campo.

Intensidad del campo en el entrehierro de una dinamo. — Para medir rápidamente la intensidad del campo magnético, en el reducido espacio del entrehierro de una dinamo, la casa Hartmann y Braun construye un aparato fundado en la propiedad que tiene el bismuto de variar su resistencia cuando está sometido a la acción de un campo magnético, *fenómeno de Hall*.

El aparato (fig. 119), se reduce a un hilo fino de bismuto, de una resistencia de 10 ohmios pró-

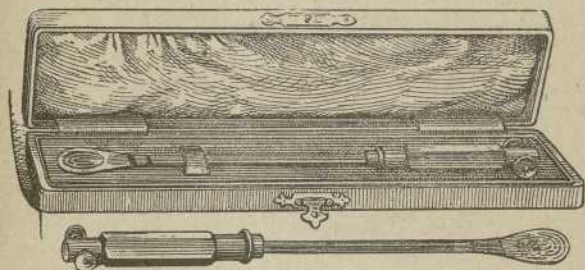


Fig. 119

ximamente, arrollado en doble espiral plana, para evitar la autoinducción, alojado entre dos láminas de mica, dando un espesor total de 0'5 milímetros. Los extremos del hilo de bismuto se unen a dos tiras de cobre, que atraviesan el mango aislador que sirve para manejar el aparato.

Para operar se determina rápidamente la resistencia antes y después de meterlo en el entrehierro de la dinamo. El incremento de resistencia, indica la intensidad del campo, mediante curvas o tablas que acompañan al aparato.

A una variación de 1000 gausios, corresponde, próximamente, una variación de un 5 % en la resistencia del bismuto.

Las curvas, se construyen tomando por abscisas los valores de \mathcal{H} y por ordenadas los valores

$$\frac{R_H - R_0}{R_0}$$

siendo R_H y R_0 las resistencias del bismuto en el campo de intensidad \mathcal{H} , y fuera del campo.

A partir de los 2000 gausios, la línea es sensiblemente recta.

Medición de un flujo. — La variación del flujo que tiene lugar en el interior de un solenoide, puede

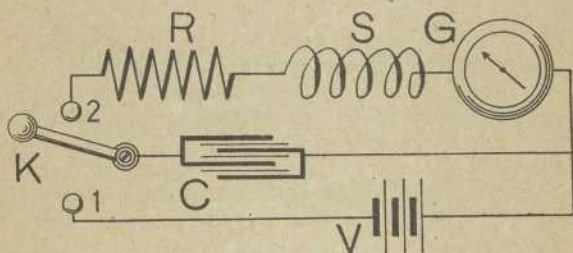


Fig. 120

medirse mediante un galvanómetro balístico, convenientemente calibrado, operando del modo siguiente:

Puesta la llave K (fig. 120) en la posición 1, la capacidad C se carga con la tensión V , almacenando una cantidad.

$$Q = CV$$

y cuando la llave pase a la posición 2, esta carga produce una corriente instantánea a través de la resistencia R y del solenoide S , dando lugar a un flujo

$$\mathcal{N} = Q(R + S) = CV(R + S)$$

Expresando C en microfaradios, V en voltios y $R + S$ en ohmios, se tiene (t. II, p. 160 y 167)

$$\mathcal{N} = 10^2 CV(R + S)$$

Observemos la desviación d sufrida por el galvanómetro balístico G y admitiendo que las desviaciones sean exactamente proporcionales a los flujos, podremos conocer un flujo cualquiera \mathcal{N}' operando como antes, midiendo la derivación d' que produce, y aplicando la fórmula

$$\mathcal{N}' = \frac{\mathcal{N}}{d} d' = 10^2 CV(R + S) \frac{d'}{d}$$

Medida de la permeabilidad. — Es importante el conocimiento de la permeabilidad exacta de los hierros empleados para la construcción de dinamos y transformadores, por la influencia que tiene en los circuitos magnéticos.

La determinación de la permeabilidad, debe hacerse empleando muestras de lingote, o plancha, según la forma en que haya de entrar el hierro en la construcción.

En estas medidas, no puede esperarse gran precisión, por la variación que determina en la permeabilidad de un hierro, su estructura molecular, la cual se modifica grandemente con el laminado, forjado, recocido, etc. Por esta causa, es frecuente ver grandes diferencias en los valores de la permeabilidad de muestras análogas de hierro, según las casas constructoras y hasta según los procedimientos seguidos para la medición.

Método directo. — Construyamos un electroimán S (fig. 121), cuyo núcleo sea del hierro que queremos estudiar, cerrando su circuito sobre un galvanómetro balístico G .

Coloquemos este solenoide entre otros dos M y N

alimentados con la corriente de una pila P , graduada con la resistencia R y medida con el amperímetro I .

Si cortamos bruscamente el circuito de la pila P , en el solenoide S desaparecerá un flujo \mathcal{N} , que mediremos por la desviación del galvanómetro balístico G , convenientemente calibrado.

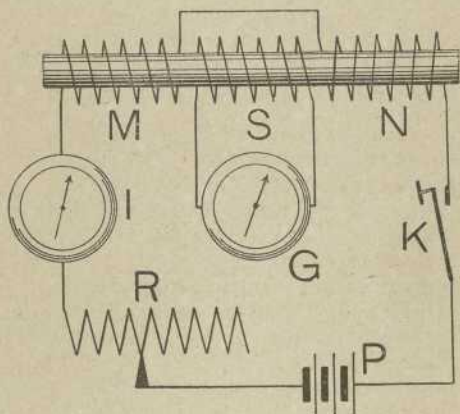


Fig. 121

Conocido el flujo, tendremos el coeficiente de permeabilidad (tomo I, pág. 132), expresando i en amperios

$$\mu = \frac{\mathcal{N}l}{4\pi mis} = \frac{10 \mathcal{N}l}{4\pi mis}$$

en función de cantidades todas conocidas.

Permeámetro Hopkinson. — La muestra M que se quiere ensayar (fig. 122), se reduce a cilindro

de dimensiones determinadas, para introducirla en un solenoide *SS*, completándose el circuito magnético mediante una culata de hierro dulce, en forma rectangular.

El solenoide, está formado de dos mitades *S, S*, teniendo en su región media

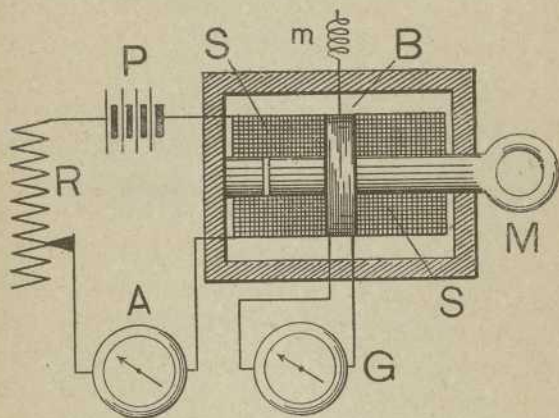


Fig. 122

un hueco en el cual se aloja un carrete *B*, que cierra su circuito sobre un galvanómetro balístico *G*.

Este carrete *B*, está constantemente solicitado por un muelle *m* y retenido en su actual situación por el núcleo *M*; de manera que si se saca el núcleo, el carrete sale rápidamente de su sitio.

Para operar, se gradúa la corriente de excitación procedente de la pila *P*, mediante el reóstato *R* y se mide con el amperímetro *A*. Se tira bruscamente del núcleo *M* y el carrete *B* salta sufriendo una variación de flujo que se mide con el balístico calibrado convenientemente.

Tendremos

$$\mathcal{N} = \frac{4\pi m i \mu s}{10l} \quad \text{o} \quad \mu = \frac{10\mathcal{N}l}{4\pi m i s}$$

La figura 123 representa un modelo del permeámetro Hopkinson, construido por la casa Carpentier. Los carretes magnetizantes tienen una lon-

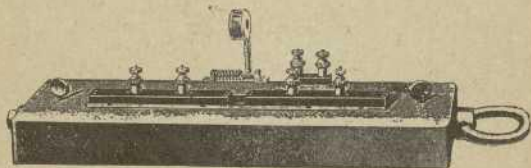


Fig. 123. — Permeámetro de Hopkinson

gitud de 35 centímetros, contienen 290 vueltas de hilo, soportan una corriente de 3 amperios y producen un campo de 30 gausios.

Permeámetro Carpentier. — Se compone el permeámetro Carpentier, de dos electroimanes BB' (fig. 124), en forma de herradura, dejando entre sus polos espacio suficiente para colocar el prisma de hierro que se quiere analizar.

Si excitamos los carretes BB' de manera que el flujo circule en el sentido de las flechas 1, podremos suponer que la muestra b no forma parte del circuito magnético, sobre todo si la permeabilidad de BB' es grande. El flujo tendrá por expresión

$$\mathcal{N} = \frac{\mathcal{F}}{2\mathcal{R}}$$

siendo \mathcal{R} la reluctancia de cada uno de los carretes B .

Invertimos la excitación en el carrete *B*, de manera que los flujos circulen en los sentidos indicados por las flechas 2, concurriendo en la muestra

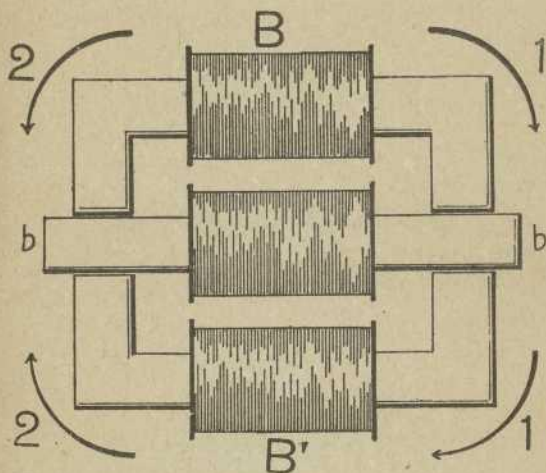


Fig. 124

b, y entonces las *BB'* resultarán montadas en derivación, dándonos un flujo

$$\mathcal{O}' = \frac{\mathcal{F}}{z + \frac{\mathcal{R}}{2}}$$

siendo *z* la reluctancia de la muestra *b*.

Este flujo es, en general, diferente del primero.

Dispongamos un circuito auxiliar rodeando a uno de los núcleos extremos, unido a un galvanómetro balístico para medir el flujo que circula por el núcleo.

Rodeemos la muestra b de un carrete y excitémosla con una fuerza magnetomotriz f escogida en magnitud y en signo para que el flujo que circula por los núcleos extremos sea el mismo en los dos experimentos, y tendremos

$$\frac{\mathcal{F}}{2\mathcal{R}} = \frac{\mathcal{F} + f}{z + \frac{\mathcal{R}}{2}} = \frac{\mathcal{F} + f}{\frac{l}{\mu s} + \frac{\mathcal{R}}{2}}$$

de donde

$$\mu = \frac{2l\mathcal{F}}{\mathcal{R}s(3\mathcal{F} + 4f)}$$

La figura 125 representa en conjunto este permeámetro, viéndose en su parte superior los tres

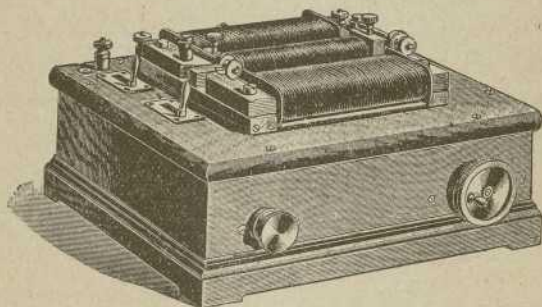


Fig. 125. — Permeámetro Picon

carretes B , B' y b y los mangos de los dos interruptores que cortan los circuitos de los carretes para la medida balística de los flujos.

En la parte anterior de la caja, se ven dos botones, que corresponden al conmutador inversor

del circuito *B* y a una disposición especial para facilitar el arreglo de la fuerza magnetomotriz \mathcal{F} .

Método de la fuerza soportante. — Para aplicar este método a una muestra cualquiera, empezaremos por darle forma de barra, para que pueda servir de núcleo a un electroimán, y, construído éste, determinaremos el peso ϕ en dinas, que es necesario aplicar a la armadura para que se desprenda del núcleo.

Con estos datos, podremos aplicar la fórmula

$$\phi = \frac{(\mu \mathcal{K})^2 s}{8\pi} \quad \text{o} \quad \mu = \sqrt{\frac{8\pi \phi}{\mathcal{K}^2 s}}$$

El valor de \mathcal{K} , podrá calcularse por la fórmula general del flujo, aplicada al circuito magnético de aire creado por el solenoide sin núcleo (tomo I, página 125)

$$\mathcal{K} = \frac{4\pi mi}{10l}$$

Si se tuviera que determinar μ para diversos cuerpos magnéticos, podríamos dar a todas las muestras igual forma, y operar en todos los experimentos con el mismo electroimán. Entonces, la fórmula de μ quedaría reducida a

$$\mu = k \sqrt{\phi}$$

siendo fácil determinar k por el cálculo o por un ensayo preliminar.

Si se trata de comparar permeabilidades de dos muestras distintas, someteremos ambas a la acción de un mismo electroimán, y la fórmula anterior nos dará

$$\frac{\mu}{\mu'} = \frac{\sqrt{\phi}}{\sqrt{\phi'}}$$

Medida de la histeresis. — Método oficial alemán.
El histeresímetro empleado por la Unión de electricistas alemanes, se compone (fig. 126), de cuatro

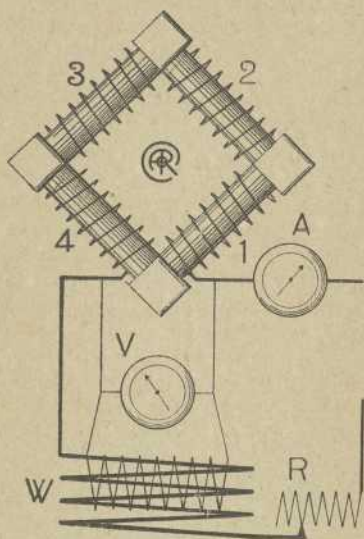


Fig. 126

carretes 1, 2, 3, 4, destinados a recibir los paquetes de láminas del hierro que se va a estudiar, dispuestos según los lados de un cuadrado. Los hierros se apoyan unos contra otros fuertemente mediante tornillos de presión, de manera que forman un circuito magnético lo más continuo posible.

Se envía a estos carretes una corriente alterna de 50 períodos y, mediante la resistencia *R*, se arregla la intensidad para que produzca una inducción magnética de 10000 gausios.

Si se conoce la sección s del circuito magnético será fácil buscar el flujo por la fórmula

$$\mathcal{F} = \mathfrak{B}s$$

que para $\mathfrak{B} = 10000$, se reduce a

$$\mathcal{F} = 10000 s$$

Con este flujo podremos calcular la fuerza electromotriz correspondiente, por la relación

$$E = 4'44/N\mathcal{F}10^{-8}$$

Conocido E , podremos regular la resistencia R hasta que las indicaciones del voltímetro V equivalgan a la fuerza electromotriz dada por la fórmula.

Se miden simultáneamente la corriente, en el amperímetro A ; la tensión en el voltímetro V , y la potencia en el vatímetro W .

La potencia total W se reparte en pérdidas en el hierro w ; efecto Joule en el cobre de los carretes RI^2 , y efectos Joule en los carretes derivados, del voltímetro y del vatímetro $\frac{V^2}{r_1}$ y $\frac{V^2}{r_2}$.

La pérdida buscada será

$$w = W - RI^2 - \frac{V^2}{r_1} - \frac{V^2}{r_2}$$

Este valor de w , permite calcular el *coeficiente de pérdida*, es decir, la pérdida por kilogramo de peso, sin más que dividir w , por el peso, en kilos, de los núcleos.

En estas pérdidas están englobadas las correspondientes a la histeresis y al efecto Foucault. Si conviene tener por separado las pérdidas por histeresis y de Foucault, se efectúa otra medición con distinta frecuencia f' ; pero igual inducción \mathfrak{B} . Las pérdidas medidas w' , serán distintas de w .

La energía consumida por histeresis, viene dada por la fórmula de Steinmetz

$$\eta \mathfrak{B}^{1.6} f V_{10}^{-7}$$

la cual nos demuestra que para un mismo volumen de hierro y para igual inducción, las pérdidas son proporcionales a la frecuencia y las podemos representar por

$$Kf \quad [1]$$

La energía consumida por las corrientes de Foucault obedece a la fórmula

$$1234 \mathfrak{B}^2 c^2 / 2 V_{10}^{-14}$$

y permaneciendo constantes, el volumen de los núcleos, el espesor de las planchas y la inducción, estas pérdidas serán proporcionales al cuadrado de la frecuencia y se podrán representar por

$$K'f^2 \quad [2]$$

Las pérdidas totales en el hierro, para una frecuencia f , tendrán la forma

$$w = Kf + K'f^2$$

y para una frecuencia f'

$$w' = Kf' + K'f'^2$$

Estas dos ecuaciones no tienen más incógnitas que K y K' , será, pues, fácil buscar el valor de cada una, y una vez hallados podremos calcular las pérdidas de histeresis y Foucault por las fórmulas [1] y [2].

Conocidas las pérdidas por histeresis podríamos buscar el coeficiente η de la fórmula de Steinmetz.

Histeresímetro Blondel-Carpentier. — De la chapa que se quiere ensayar, se cortan anillos que ten-

gan 38 mm. de diámetro interior y 55 de diámetro exterior y se apilan sobre un soporte que lleva el aparato (fig. 127), hasta alcanzar una altura de 4 milímetros.

Se coloca el soporte en el aparato y queda sometido a la acción de un potente imán en forma de

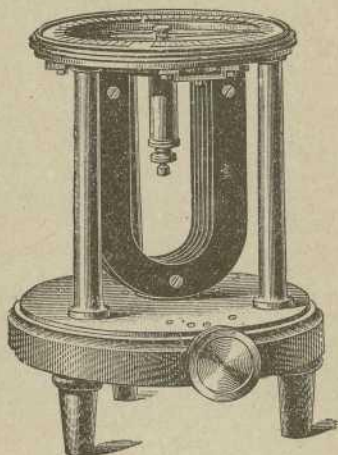


Fig. 127. Histeresímetro Blondel-Carpentier

U, cuyas piezas polares envuelven al anillo de chapas, sometiéndolo a una intensidad de 10000 gausios próximamente.

Mediante una manivela y un engranaje multiplicador, se imprime al imán rápido movimiento giratorio, que determina sobre el hierro un ciclo completo de imantación en cada vuelta.

El hierro tiende a seguir la rotación del imán, pero se lo impide un resorte en hélice, fijo al soporte del aparato, y su giro se limita a un ángulo α que se mide mediante una aguja indicadora que lleva el soporte del anillo.

El par de rotación que se desarrolla entre el hierro y el imán, es debido a la energía consumida por histeresis, de manera que tendremos según la fórmula de Steinmetz

$$\eta \mathfrak{B}^{1.6} f V 10^{-7} = K\alpha$$

Para otra muestra tendríamos

$$\eta' \mathfrak{B}^{1.6} f V' 10^{-7} = K\alpha'$$

y por lo tanto

$$\frac{\eta V}{\eta' V'} = \frac{\alpha}{\alpha'} \quad \text{o} \quad \eta' = \frac{\eta V \alpha'}{V' \alpha}$$

A cada aparato acompaña una muestra de hierro, cuyo coeficiente de Steinmetz es perfectamente determinado, con lo cual, puede determinarse otro coeficiente cualquiera, mediante la fórmula anterior.

El histeresímetro Blondel-Carpentier mide la pérdida de un hierro por efecto de histeresis, sometido a la acción de un campo giratorio. Esta *histeresis giratoria*, es un 25 % mayor que la *histeresis alterna*.

Histeresímetro Ewing. — Entre los extremos *A* y *B* de un aro metálico, se fija el prisma formado por las láminas de palastro que queremos estudiar (fig. 128), dando al conjunto rápido movimiento de rotación alrededor de eje *o*, mediante un engranaje y una manivela.

La rotación del prisma *AB* tiene lugar en el campo magnético creado por un imán *CD*, suspendido mediante cuchillas apoyadas en planos de ágata, y que puede girar alrededor del eje *o'* prolongación del *o*.

Para operar se imprime al prisma *AB* un movimiento de rotación cada vez más rápido, hasta conseguir que el imán se desvíe de su posición de

equilibrio y ocupe una posición fija. Cuando esta se consiga existirá una relación entre el ángulo de desviación y la pérdida por histeresis, que se determina mediante tablas dadas por el constructor

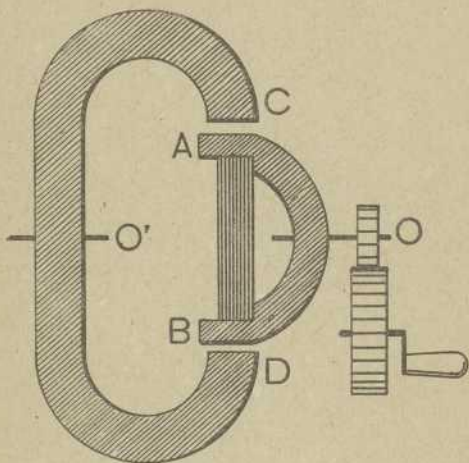


Fig. 128

o por comparación con otras muestras conocidas que acompañan al aparato.

La pérdida obtenida es por ciclo, luego satisface a la fórmula

$$W = \eta \mathfrak{B}^{1.6} V 10^{-7}$$

y la inducción que produce el imán permanente, es de unos 4000 gausios próximamente.

De la fórmula anterior se deduce el valor de η correspondiente a la muestra ensayada.

CAPÍTULO X

OSCILÓGRAFO

Corrientes alternas no senoidales. — En el tomo II, cap. II, estudiamos las corrientes alternas inducidas en una espira que se movía uniformemente en el seno de un campo uniforme, corrientes que

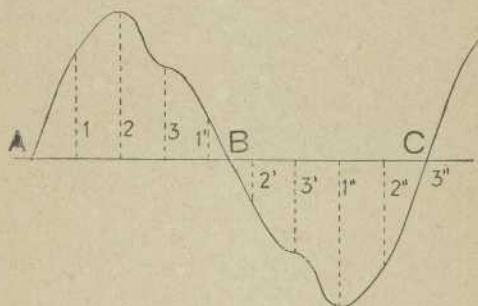


Fig. 129

resultaban perfectamente senoidales; pero cuando el campo inductor no es uniforme, o la reluctancia del circuito magnético no es constante o, en fin, varía cualquiera de las condiciones supuestas, las corrientes dejan de ser senoidales, pudiendo únicamente asegurarse que *serán periódicas mientras la rotación de la espira sea uniforme.*

Las variaciones de la intensidad y de la fuerza electromotriz, en corrientes alternas no perfectamente senoidales, vienen dadas por las ordenadas de una curva periódica (fig. 129), que se aparta más de la senoide, cuanto menos senoidal resulta la corriente inducida en el alternador.

Para estudiar la curva representativa de las constantes de un alternador se emplean distintos métodos. He aquí algunos de ellos.

Método de Joubert. — Para aplicar este método se pone en el eje del alternador un disco (fig. 130),

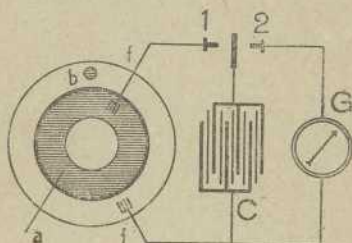


Fig. 130

formado por dos coronas; la *a*, de bronce, en comunicación con un extremo del circuito que se va a estudiar; la *b* de ebonita, pero llevando un punto metálico en comunicación con el otro extremo del circuito. Los frotadores *f* y *f'* fijos, recogerán corriente sólo en los instantes en que el punto metálico de *b* toque a *f'*, es decir, un instante en cada período.

El condensador *C* se cargará, si la llave se apoya en el contacto 1, y se descargará sobre el galvanómetro balístico *G*, si se apoya la llave en el contacto 2.

Maniobrando la llave con oportunidad y rapi-

dez, tendremos en G desviaciones proporcionales a la carga de C , es decir, a la diferencia de tensión existente entre los puntos f y f' .

Variando la posición del frotador f' , el contacto con b se verificará en otro momento del período, y, por tanto, tendremos observaciones correspondientes a otra fase.

Para realizar automáticamente los movimientos del conmutador, las desviaciones de f' , y hasta el trazado de la curva, se contruyen los aparatos llamados *ondagrafos*, substituídos hoy por los oscilógrafos que vamos a estudiar.

Oscilógrafo de Blondel. — Permite ver y fotografiar la curva de una corriente alterna, mediante la combinación de un *galvanómetro de espejo* y un *espejo oscilante*. La frecuencia propia de 5000 a 50000 períodos que adquiere el galvanómetro de este oscilógrafo se realiza mediante el empleo de dos tipos de galvanómetros: el de corrientes fijas e imán movable, y el de imán fijo y corriente movable.

Galvanómetro de corrientes fijas. — La parte magnética de este galvanómetro está constituida por una cinta de hierro de 0'5 mm. de ancha por 0'2 mm. de gruesa. Esta cinta está estirada verticalmente y puede templarse como la cuerda de un instrumento musical con objeto de variar la frecuencia propia y su esfuerzo de torsión.

En la figura 131 se representa el galvanómetro cortado por un plano horizontal, siendo C la sección de la cinta de hierro. Esta cinta, está influida por los polos NS de un potente imán permanente, y, por lo tanto, resultará imantada. Norte en el borde derecho y Sur en el izquierdo.

Frente a las dos caras de la cinta de hierro, existen dos carretes B , B' , recorridos por la corriente que se estudia. Siendo esta corriente alterna, se comprende fácilmente que durante un

semiperíodo el carrete *B* atraerá al borde derecho y el *B'* al izquierdo ; pero durante el otro semiperíodo, se invertirán los efectos. Además, el esfuerzo de la torsión que los carretes ejercen sobre la cinta, será en todo momento, proporcional a la intensidad de la corriente que circula por ellos.

La lámina de acero lleva un espejito circular, cuyo diámetro alcanza solamente algunas décimas de milímetro. Lámina y espejo van alojados en

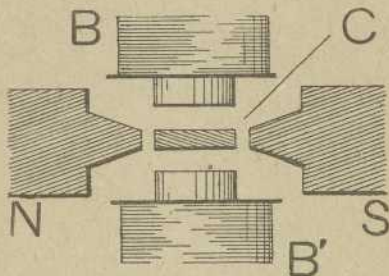


Fig. 131

un tubo de vidrio, lleno de aceite de ricino, que obra como amortiguador, con lo cual se está seguro de que los movimientos de la cinta son debidos únicamente a la acción de los carretes *B*, *B'*.

Generalmente, los oscilógrafos son dobles, es decir, llevan dos galvanómetros con objeto de estudiar simultáneamente dos curvas, que pueden ser las de tensión e intensidad de una misma corriente, las tensiones o intensidades de los dos circuitos de un transformador estático, etc., etc. Es claro que los carretes del galvanómetro deberán ser amperimétricos o voltimétricos, según los casos, es decir, de hilo corto y grueso para montar

en serie o en hilo largo y fino para montar en derivación.

La figura 132 representa la parte interior de un oscilógrafo Blondel construido por la casa Carpen-

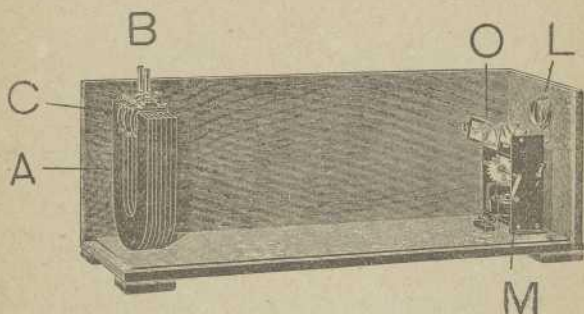


Fig. 132

tier. En *A* se ve el imán permanente, formado por un haz de seis láminas magnéticas. En *B*, los tornillos tensores de las láminas de acero. En *C*, los carretes correspondientes al doble galvanómetro.

Galvanómetro de corrientes móviles.— El segundo tipo de galvanómetro empleado en el oscilógrafo Blondel, es el llamado bifilar y es, en esencia, un galvanómetro D'Arsonval, en el que el cuadro movable se compone de una sola vuelta de hilo.

El imán permanente termina en dos piezas polares largas y finas *N*, *S*, (fig. 133), y entre ellas se dispone una espira de hilo fino o cinta, de bronce fosforoso, que se apoya por su parte superior en dos poleítas de marfil y termina en muelles, que permiten templar con igual tensión las dos ramas.

Al circular la corriente por la espira, ésta se convierte en hoja magnética, pero sus caras Norte

y Sur cambian tan rápidamente como el sentido de la corriente.

Templando las ramas de la espira, de manera que alcancen un período de vibración propia, mucho mayor que el período de la corriente que se estudia, conseguiremos que la espira oscile, y con ella el espejito *e*, en perfecto sincronismo con la corriente.

La parte movable está, como en el galvanómetro de hierro dulce, encerrada en un tubo lleno de un líquido transparente, como el aceite, el bálsamo del Canadá, etc., que le sirve de amortiguador de sus oscilaciones propias.

Con el galvanómetro de hierro, la desviación del rayo luminoso reflejado, después de ampliada por el sistema óptico, alcanza hasta 30 o 40 milímetros por cada amperio que circule por los carretes cuando la frecuencia propia de la lámina llega a 5000 períodos por segundo. Con el galvanómetro bifilar, para igual frecuencia de vibración propia del sistema movable, se alcanza una amplitud de movimientos del punto luminoso hasta de 300 milímetros por amperio que pase por la espira.

Cuando se quiere aumentar la sensibilidad del oscilógrafo, se substituye el imán permanente del galvanómetro, por un potente electroimán alimentado por una corriente continua. Con él, se consigue ampliar los movimientos del punto luminoso hasta los 1000 mm. por cada amperio que circule por la espira movable.

La figura 134 corresponde a un galvanómetro, especial para oscilógrafo Blondel, provisto de potente electroimán NS. Entre sus polos hay dos

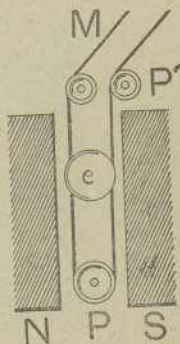


Fig. 133

espiras bifilares *M*, que forman un doble galvanómetro de corrientes movibles para el estudio simultáneo de dos curvas. Las dos espiras van encerradas

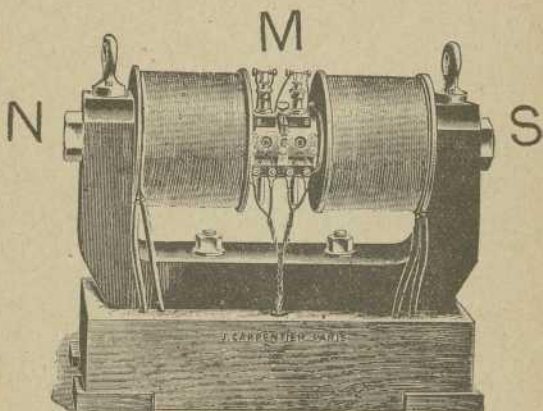


Fig. 134

en una caja, que contiene el líquido amortiguador, y está provista de dos ventanas de mira para el rayo de luz de los dos espejitos.

Sistema óptico. — Enviando al espejito un rayo de luz, y recibiendo en una pantalla el rayo reflejado, veremos que el punto luminoso se mueve periódicamente, pero sin salir de una recta. Para que éste describa una senoide, es preciso combinar su movimiento oscilatorio rectilíneo con otro uniforme perpendicular al primero, lo cual se consigue recibiendo el rayo reflejado por el galvanómetro, en un espejo oscilante que lo refleje de nuevo sobre la pantalla opaca.

El espejo del galvanómetro, gira alrededor de

un eje vertical. El espejo oscilante debe girar alrededor de un eje horizontal. Veamos la disposición adoptada por la casa Carpentier.

Un arco voltaico *A*, oculto tras una pantalla (fig. 135), emite un haz luminoso a través de una lente *L*, que se concentra mediante otra lente planoesférica *E* y llega al espejito *G* del galvanómetro.

El rayo reflejado, que se mueve en un plano horizontal, se recibe en una lente cilíndrica *C*, de

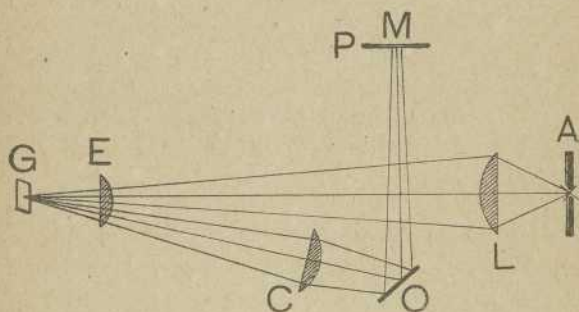


Fig. 135

eje horizontal, que le concentra reduciéndolo a un punto luminoso muy intenso. Esta imagen llega al espejo oscilante *O*, que la refleja a la pantalla transparente *P* para ser observada y fotografiada.

En la figura 132 entra por *L* el haz luminoso y se ve en *O* el espejo giratorio.

Sincronoscopio. — Llámanse sincronoscopio el mecanismo que mueve el espejo. Estos movimientos deben estar en perfecto sincronismo con la frecuencia de la corriente, luego el motor debe ser *sincrónico* y alimentado por la misma corriente que se estudia, o por una de las corrientes, si es

que se estudian simultáneamente dos. El inductor es un imán giratorio, de seis polos, y el inducido es fijo y devanado para aquel número de polos.

El número de revoluciones por segundo es el tercio de la frecuencia.

El motor comunica su movimiento al espejo mediante una excéntrica especial, que convierte el movimiento de rotación en movimiento oscilante.

Durante los dos primeros tercios de revolución del rotor, el espejo gira en un sentido con movimiento uniforme, y durante el último tercio, el espejo gira rápidamente en sentido contrario.

Además, el motor actúa sobre un obturador que intercepta el rayo luminoso durante el último tercio de la revolución de rotor.

Resulta de todo esto, que sobre la pantalla transparente veremos dibujarse dos períodos completos de senoide, y desaparecer el punto luminoso durante el tercer período. Reaparece de nuevo el punto para dibujar otros dos períodos y así sucesivamente. La persistencia de las imágenes luminosas en nuestra retina, producirá en el observador la ilusión de una imagen continua.

Cuando se desea obtener fotografía de la curva de corriente, entra en función un mecanismo especial, que actúa sobre el obturador permitiendo el paso del rayo luminoso, una sola vez.

La placa transparente se substituye por el chasis de una máquina fotográfica y sobre la placa obtendremos la doble onda de senoide correspondiente a la corriente que se estudia.

Para poner en marcha el motor sincrónico, es preciso dar a su rotor la velocidad del sincronismo y para ello, el oscilógrafo (fig. 132) lleva en *M* una manivela, que es prolongación del eje del rotor, a la cual debe imprimirse un movimiento rápido para que el motor arranque.

En el modelo que vimos funcionar en la Escuela especial de Ingenieros de Minas, el arranque

del sincronoscopio resultaba un tanto enojoso y lento.

La figura 136 representa el oscilógrafo Blondel preparado para emplear el galvanómetro de electroimán *E*, en lugar del de imán permanente.

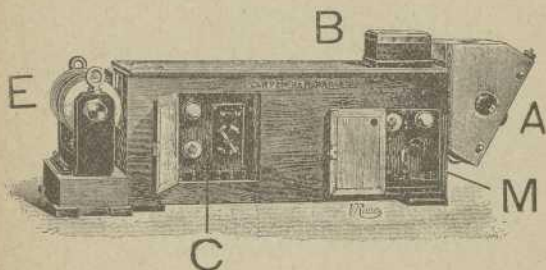


Fig. 136

En la figura se ven: en *C* los interruptores, fusibles, conmutadores y bornes de empalme para toda la parte eléctrica del aparato; en *B* la pantalla de observación y sitio para colocar el chasis fotográfico; en *A*, la cabina para el arco y en *M*, la manivela para poner en marcha el motor sincrónico del sincronoscopio encargado de mover el espejo.

FIN DEL TOMO XVIII

INDICE

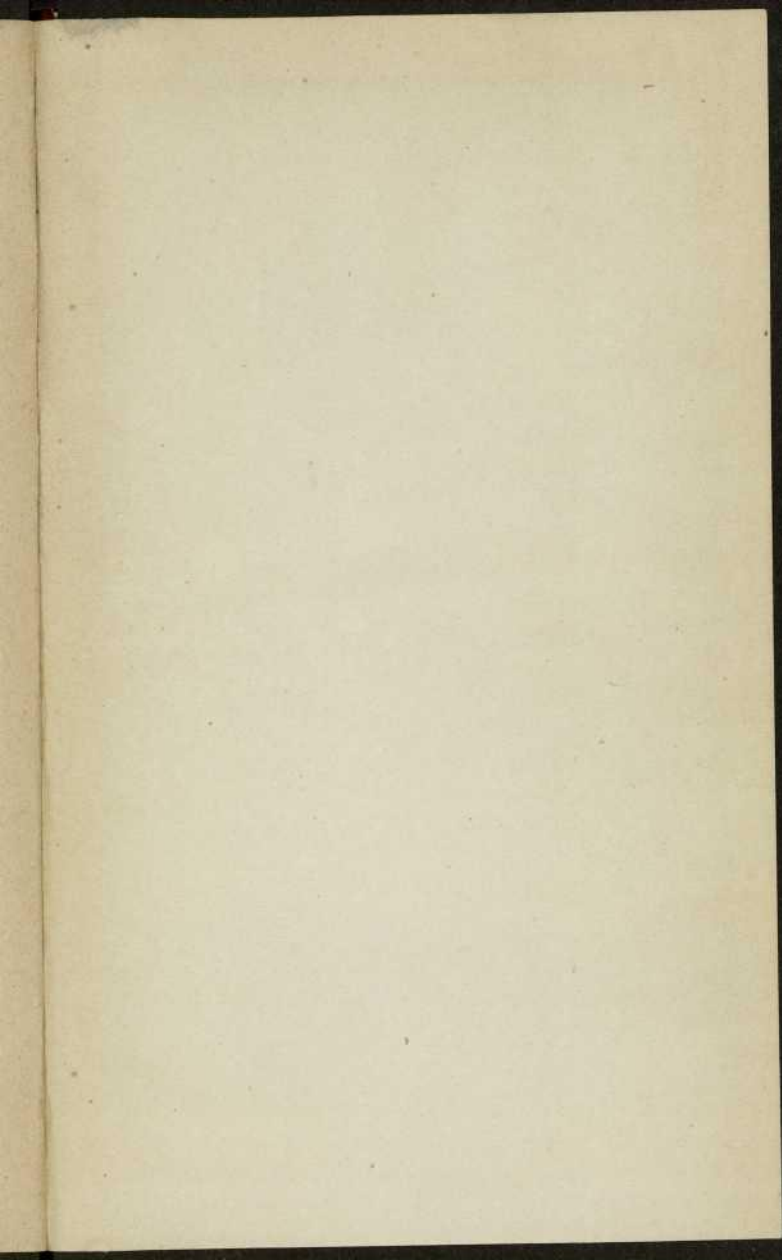
	<u>Página</u>
<i>Preliminares</i>	5
CAPÍTULO I. — Medida de intensidades. Voltímetros, Galvanómetros y Electrodinámometros	7
Patrón de intensidad de corriente	7
Voltímetros	7
Otros aparatos empleados	8
Galvanómetros de imán movable	9
Galvanómetro de Kelvin	9
Sistema astático	11
Lectura de ángulos	13
Escala para la reflexión	16
Galvanómetro de tangentes	17
Galvanómetro de senos	18
Galvanómetro de Thomson	21
Galvanómetro de Broca	24
Factor de reducción y constante de un galvanómetro	26
Galvanómetro balístico	27
Galvanómetro balístico de Hartmann y Braun	28
Galvanómetro de imán fijo	29
Fórmulas del galvanómetro de imán fijo ..	30
Galvanómetro Deprez D'Arsonval	31
Galvanómetro balístico de imán fijo	32
Tipo de lectura directa	33
Galvanómetro registrador	34
Electrodinámometros	35
Electrodinámometros Siemens	36
Balanza electrodinámica de Kelvin	37
Balanza electrodinámica de Pellat	39

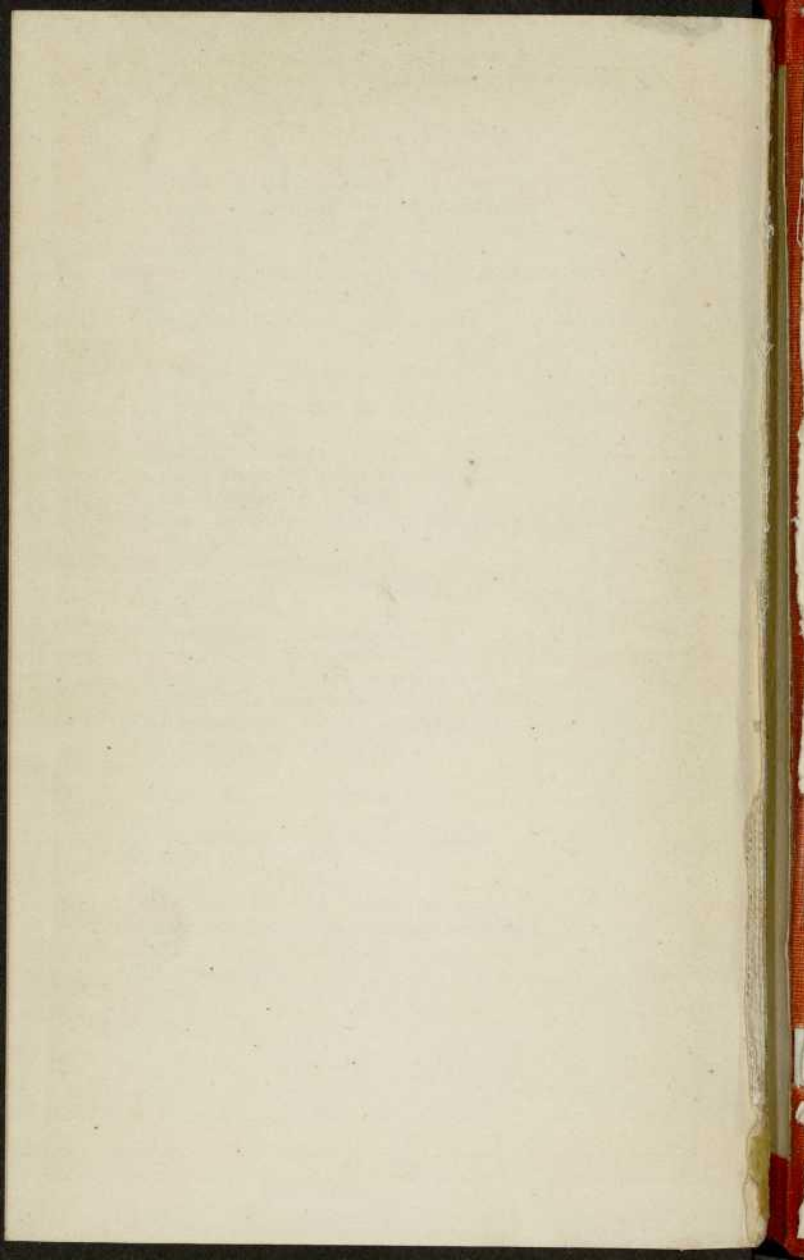
CAPÍTULO II. — <i>Amperímetros, shunts y transformadores de intensidad</i>	41
Amperímetros	41
Amperímetro Carpentier	43
Amperímetro Chauvin y Arnoux	44
Amperímetro Hummel	45
Amperímetro Dobrowolsky	46
Amperímetro Lippmann	47
Amperímetro de inducción Siemens Halske	48
Amperímetro térmico de Hartmann y Braun	49
Amperímetro térmico de Chauvin y Arnoux	49
Shunt	51
Transformadores	53
Graduación y rectificación de amperímetros	58
Graduación de un aparato en microamperios	60
Fórmula de mérito	61
CAPÍTULO III. — <i>Medida de potenciales</i>	63
Patrón de fuerza electromotriz Latimer-Clark	63
Patrón Weston	64
Medida de potenciales	65
Método del condensador	66
Electrómetro de cuadrantes	66
Electrómetro aperiódico Carpentier	69
Medida de la tensión en un punto	70
Medida de la diferencia de tensión entre dos puntos	71
Medida de una diferencia de potencial alterna	72
Método idiostático	72
Método de Poggendorf	73
Fórmula independiente de P	73
Potenciómetros	74
Potenciómetros de Clark	76
Potenciómetros Carpentier	78
Resistencias compuestas	80
Resistencia parcial	82
Circuito galvanométrico	82
Regulación del aparato	83
Manera de operar	83
Voltímetros	84

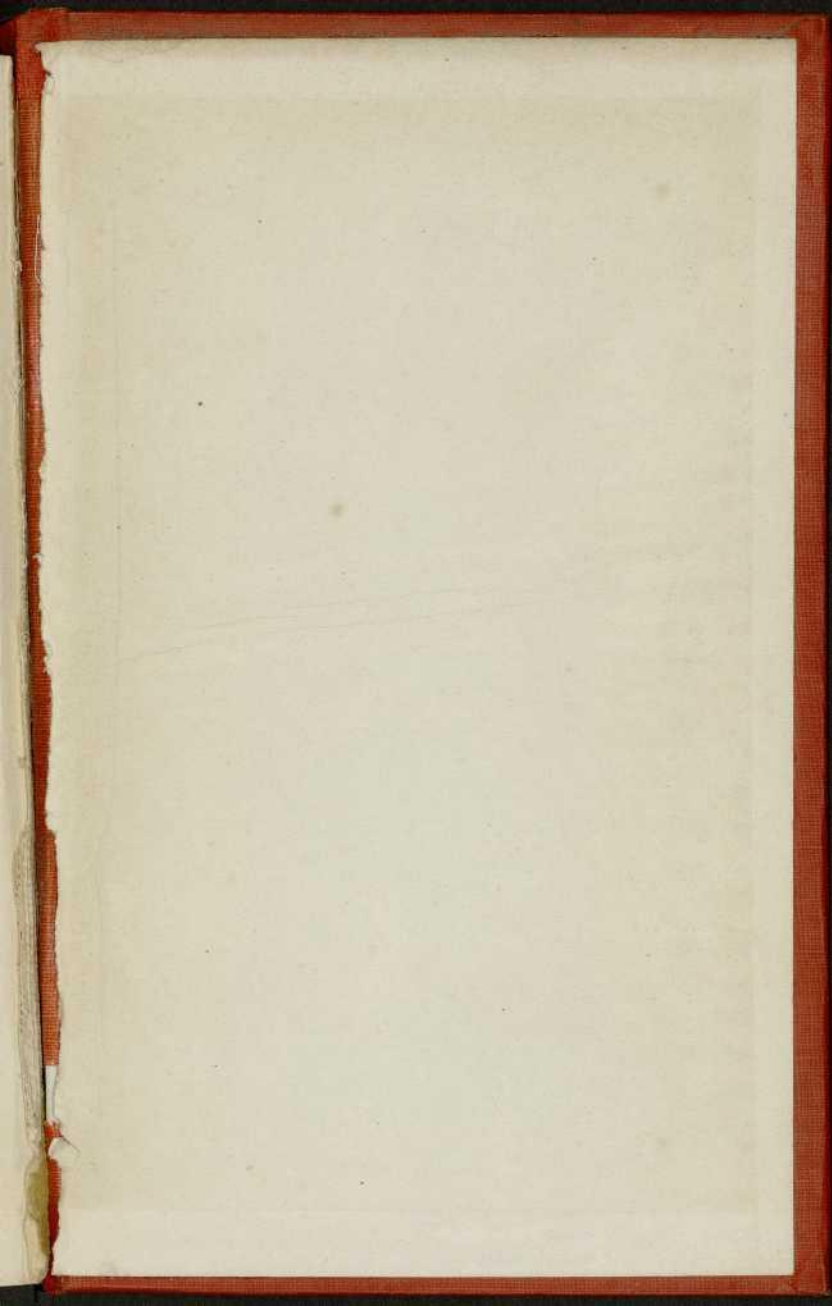
	<u>Página</u>
Voltímetro electrostático de Kelvin	87
Balanza electrostática de Lord Kelvin	88
Voltímetro electrostático Abraham-Villard.	90
Voltímetro electrostático de Carpentier	91
Electrización de los vidrios	92
Reductores	94
Cálculo de un reductor	94
Transformadores de tensión	95
Influencia de la frecuencia	97
Rectificación y graduación de voltímetros.	97
CAPÍTULO IV. — <i>Medida de resistencia</i>	99
Patrones de resistencia	99
Grandes resistencias para débiles intensidades	101
Resistencias para grandes intensidades	102
Caja de resistencias	104
Caja de décadas	105
Caja circular de décadas	106
Ohmímetros	108
Ohmímetro de cuadrante	109
Ohmímetro Chauvin y Arnoux	109
Medida de resistencias ordinarias	111
Medida de resistencias con tensión	111
Método del puente de Wheaststone	112
Caja de resistencias con puente	113
Puente con hilo de afinación	115
Puente de hilo y regla graduada	116
Puente doble de Thomson	117
Puente de conductibilidad	119
Método de substitución	120
Método del galvanómetro diferencial	121
Resistencia interior de una pila	123
Resistencia de los acumuladores	124
Resistencia de un galvanómetro	125
Método de Thomson	126
Resistencia de un líquido	127
Puente simplificado de Kohlrausch	130
Método de la caída óhmica	131
Galvanómetro universal de Siemens	131
Medida de una resistencia ordinaria	134
Método de Kohlrausch	136

	<u>Página</u>
Resistencias con fuerza contraelectromotriz.	136
Determinación de un contacto con tierra ..	137
Medida de grandes resistencias	139
Medida de tensiones	141
Medida de intensidades.....	142
 CAPÍTULO V. — <i>Medida de capacidades</i>	 143
Método de comparación	143
Método de Faraday	145
Método de Gott.....	146
 CAPÍTULO VI. — <i>Medida de la potencia eléctrica.</i>	 148
Potencia de una corriente continua	148
Watímetros	148
Potencia de una corriente alternativa	150
Cálculo de la potencia en un circuito con reactancia. Método de los voltímetros ..	151
Método de los amperímetros	152
Instalación de watímetros.....	153
Sistema trifásico equilibrado, sin neutro ..	153
Sistema trifásico equilibrado, con neutro...	153
Creación de un punto neutro artificial	154
Sistema trifásico no equilibrado	155
Determinación del ángulo φ en un circuito..	155
 CAPÍTULO VII. — <i>Medida de la diferencia de fase y de frecuencia</i>	 156
Método de los watímetros	156
Método de los electrodinamómetros	157
Fasímetro Brüger	157
Fasímetro Dobrowsky	159
Frecuencímetros	161
Frecuencímetro Frahm.....	161
Frecuencímetro Ferrié-Carpentier	163
 CAPÍTULO VIII. — <i>Medida de la inducción</i> ...	 165
Carretes de inducción	165
Cálculo del coeficiente de autoinducción ..	166
Método del fasímetro	167
Método de las constantes eficaces	167

	Página
Método de los voltímetros	168
Método del galvanómetro diferencial	168
Método de Maxwell o de comparación	170
Secómetro	171
Medida del coeficiente de inducción mutua ..	172
Método de comparación	172
Medida directa	173
 CAPÍTULO IX. — <i>Medidas magnéticas</i>	 176
Momento magnético de un imán e intensidad de un campo	 176
Rueda de Fischer	176
Comparación de intensidades	177
Inclinómetro de Weber	177
Intensidad del campo en el entrehierro de dínamo	 179
Medición de un flujo	180
Medida de la permeabilidad	181
Método directo	181
Permeámetro Hopkinson	182
Permeámetro Carpentier	184
Método de la fuerza soportante	187
Medida de la histeresis. Método oficial alemán.	188
Histeresímetro Blondel-Carpentier	190
Histeresímetro Ewing	192
 CAPÍTULO X. — <i>Oscilógrafo</i>	 194
Corrientes alternas no senoidales	194
Método de Joubert	195
Oscilógrafo de Blondel	196
Galvanómetros de corrientes fijas	196
Galvanómetro de corrientes movibles	198
Sistema óptico	200
Sincronoscopio	201







2

25451

MEMORIAS DE LA ESCUELA