

ING. ANDRES M. KAR CZ

PROFESOR TITULAR DE MEDICIONES ELÉCTRICAS
DEL INSTITUTO UNIVERSITARIO POLITÉCNICO
DE BARQUISIMETO VENEZUELA

FUNDAMENTOS
DE
METROLOGIA ELECTRICA

TOMO I

Unidades, Patrones, Instrumentos



EDICIONES TÉCNICAS MARCOMBO, S.A.
BOIXAREU EDITORES

Av. José Antonio, 594 - BARCELONA - 7

© Andrés M. Karcz, 1975

Reservados todos los derechos de
publicación en cualquier idioma
por MARCOMBO, S. A. 1975

ISBN: 84 - 267 - 0294 - 5 (obra completa)
ISBN: 84 - 267 - 0295 - 3 (tomo I)

Impreso en España

Depósito Legal: B. 3.488 - 1975

Printed in Spain

, Gráficas Casulleras — Sepúlveda, 79 — Barcelona - 15

Expreso mi agradecimiento por la colaboración prestada por las firmas productoras de instrumentos de medición y especialmente a:

A.O.I.P. Mesures. París, Francia.

HARTMANN & BRAUN, A. G. Frankfurt/M,
Alemania Federal.

HARTMANN & BRAUN, Controles Eléctricos, Sao Paulo, Brasil.

H. TINSLEY & Co. LTD. Londres, Inglaterra.

YOKOGAWA ELECTRIC WORKS, LTD. Tokio,
Japón.

I N D I C E

Introducción	PAG. 15
--------------------	------------

CAPÍTULO I

UNIDADES Y PATRONES

Unidades	17
Patrones	19
Patrón de diferencia de potenciales	21
Características eléctricas de la pila Weston saturada	23
Empleo de la pila Weston	24
Patrones de resistencias	24
Patrones de inductancia	32
Patrones de capacidad	40

CAPÍTULO II

REGULACION DE TENSIONES E INTENSIDADES EN CIRCUITOS DE MEDICION

Generalidades	47
Alimentación con corriente continua	48
Alimentación con corriente alterna	51
Regulación de tensión con autotransformador de relación variable	52
Aplicación de resistencias variables en la regulación de la tensión e intensidad	58
Regulación en serie	61
Regulación en derivación	64

CAPÍTULO III

GENERALIDADES SOBRE INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

	<u>PAG.</u>
Generalidades	67
Momentos	68
Errores y clases de instrumentos	72
Sensibilidad y constante	78
Instrumentos de medición. Su clasificación	79
Dispositivos indicadores	83
Escalas	85
Simbolos e indicaciones sobre cuadrantes	94
Corrector de cero	92
Dispositivos antagonistas	99
Dispositivos amortiguadores	101
Pivotes y suspensiones	104

CAPÍTULO IV

INSTRUMENTOS MAGNETOELECTRICOS

Generalidades	108
Instrumentos magnetoeléctricos de bobina móvil	109
Momento motor	113
Voltímetro magnetoeléctrico	115
Amperímetro magnetoeléctrico	119
Ohmetro magnetoeléctrico	122
Instrumentos magnetoeléctricos con rectificador	125
Rectificación de la corriente en instrumentos	128
Instrumentos múltiples	132
Instrumentos magnetoeléctricos con termoelemento	135
Construcción de transductores termoeléctricos	136
Instrumentos magnetoeléctricos diferenciales. Logómetros	140
Instrumentos magnetoeléctricos de imán móvil	147
Sistema Ayrton	149

CAPÍTULO V

INSTRUMENTOS ELECTROMAGNETICOS

	PÁG.
Principio de funcionamiento	153
Sistemas mononúcleo y polinúcleo	154
Momento motor y escalas	157
Voltímetro electromagnético	160
Amperímetro electromagnético	161
Frecuencímetro electromagnético de lengüetas vibrantes	163

CAPÍTULO VI

INSTRUMENTOS ELECTRODINAMICOS

Generalidades	168
Momento motor	172
Voltímetro	174
Amperímetro	175
Vatímetro	177
Determinación de la constante de escala	180
Ampliación del alcance de tensión	181
Varímetro	183
Logómetros electrodinámicos	186
Fasímetro (cofímetro)	188
Frecuencímetro	189

CAPÍTULO VII

INSTRUMENTOS DE INDUCCION

Principio de funcionamiento	190
Sistema de un flujo	191
Sistema de dos flujos	192
Momento motor	195
Sistema de tambor	197

CAPÍTULO VIII

INSTRUMENTOS ELECTROSTATICOS

	PAG.
Generalidades	200
Sistema multicelular	201
Momento motor	203
Voltímetro electrostático	205
Ampliación de escala	205

CAPÍTULO IX

INSTRUMENTOS ELECTROTERMICOS

Generalidades	209
Sistema de hilo caliente	210
Momento motor	211
Sistema bimetálico	212

CAPÍTULO X

GALVANOMETROS

Generalidades	214
Tipos de galvanómetros y características principales	215
Período de oscilación libre (T_0)	221
Ecuación del movimiento cinético	226
Galvanómetro común	228
Sensibilidades y constantes	231
Cambio de alcance	233
Shunt de Ayrton	235
Galvanómetro balístico	235
Sensibilidad y constante del galvanómetro balístico	237
Galvanómetro lento (fluxómetro)	238
Constante de tensión	240
Empleo del fluxómetro	242
Galvanómetro de vibración (resonancia)	243
Sensibilidad del galvanómetro de vibración	246

CAPÍTULO XI

VERIFICACION DE INSTRUMENTOS DE MEDICION

	<u>PAG.</u>
Generalidades	248
Verificación de instrumentos magnetoeléctricos	251
Verificación de instrumentos magnetoeléctricos con rectificador ...	255
Verificación de instrumentos electromagnéticos	256
Verificación de instrumentos electrodinámicos	258
Determinación de parámetros de galvanómetros	261
Bibliografía del 1. ^{er} tomo	269

INTRODUCCION

La presente obra FUNDAMENTOS DE METROLOGIA ELECTRICA consta de tres tomos, aunque constituyen una unidad.

El primer tomo, con el título UNIDADES, PATRONES E INSTRUMENTOS, introduce al lector en el campo de las mediciones eléctricas empezando por la descripción del sistema de unidades y sus correspondientes patrones. A continuación se familiariza al lector con los métodos y aparatos de regulación que se utilizan en circuitos de medición. Un capítulo está dedicado a la clasificación de los instrumentos de medición y a la descripción de sus elementos componentes comunes. En los capítulos subsiguientes se describen y analizan uno por uno los diferentes sistemas motor de los instrumentos de medición. Por último, se dan los métodos de verificación de los diferentes tipos de instrumentos.

En los últimos años ha adquirido mucha importancia el uso de instrumentos denominados "digitales". Sin embargo, este tipo de instrumentos nunca puede prestar los mismos servicios que los instrumentos de escala que se describen en esta obra. Los fabricantes de instrumentos profetizan que en el futuro próximo los instrumentos digitales reemplazarán a los instrumentos convencionales únicamente en ciertos casos determinados debido a inconvenientes de tipo operacional. El costo de los instrumentos digitales es hoy elevado, pero llegará a ser inferior al de los instrumentos de escala, pues éstos requieren en su producción la mecánica de alta precisión. En esta obra no se tratará de los digitales dejando este tema para otra posterior publicación.

El segundo tomo titulado PARAMETROS BASICOS está dedicado a las mediciones de magnitudes fundamentales, o sea, resistencias activas, inductancias, capacidades y fuerzas electromotrices. El primer capítulo introduce al lector en la organización y preparación de las mediciones y redacción de los informes pertinentes. En capítulos subsiguientes se describen, por separado, métodos técnicos (indus-

triales) y métodos que se emplean en laboratorios para determinar los valores de las magnitudes mencionadas.

El tercer tomo tiene como título POTENCIA Y ENERGIA, ya que su contenido abarca los métodos, instrumentos y dispositivos especiales que se utilizan en mediciones industriales correspondientes.

En esta obra no están incluidos los temas referentes a las mediciones de magnitudes magnéticas, ya que fueron tratados exhaustivamente en mi libro ELECTROMETRÍA DE MATERIALES MAGNETICOS. (Editorial MARCOMBO, S. A., 1972.)

Al preparar la presente obra, de carácter eminentemente didáctico y práctico me he guiado por los siguientes criterios:

1. Presentar un manual de fácil utilización para los profesionales que se dedican a realizar mediciones eléctricas.

2. Ordenar y desarrollar los razonamientos de tal modo que los que posean conocimientos de Electrotecnia puedan estudiar una importante rama de esa ciencia.

El libro cubre los temas de la materia de Mediciones Eléctricas del programa de estudios en la mayoría de las Universidades Tecnológicas.

Además, con el fin de hacer esta obra más práctica para consultas referentes a los métodos de medición, de acuerdo con la finalidad perseguida y con la disponibilidad del instrumental, se ha dispuesto el material separando los métodos de laboratorio de los métodos industriales (tomo II).

Espero que esta obra en la cual he volcado toda mi experiencia docente e industrial y en la que se encuentran datos obtenidos, en fecha reciente, de importantes firmas fabricantes de equipos de medición, será de utilidad al lector.

Ing. Andrés M. KARCZ

Capítulo I

UNIDADES Y PATRONES

Medir, significa comparar una magnitud de valor desconocido con una determinada unidad de medida previamente elegida; esta operación se efectúa mediante un experimento físico. El procedimiento de medición puede ser llevado a cabo por comparación directa con la unidad de medida, o también, mediante un instrumento graduado previamente con los patrones correspondientes, de tal manera que una escala indica el valor buscado. Un ejemplo de los dos métodos sería el de la determinación del peso de un elemento mediante una balanza clásica y utilizando pesas patrones o empleando una balanza de resortes provista de una escala graduada. En mediciones eléctricas se utilizan ambos métodos, o sea, mediciones realizadas con instrumentos graduados o con el método de comparación de las magnitudes medidas con los patrones. Las mediciones con patrones se emplean preferentemente en laboratorios.

Para realizar la medición de una magnitud, es imprescindible conocer la unidad de medida correspondiente a dicha magnitud. Todas las magnitudes pueden ser objeto de medición y todas pueden compararse con su unidad.

Las unidades de medida que se emplean en la tecnología son adoptadas internacionalmente. Existen varios sistemas de unidades, todos con ventajas y desventajas; por tanto, la elección del sistema más conveniente es difícil. Por un lado, existe cierto conservadurismo pues, como es sabido, una vez adoptado un sistema, no es fácil empezar a utilizar otro. Por otra parte, cada sistema tiene, como ya hemos mencionado, sus ventajas particulares. Para poder movernos fácilmente en el campo de las mediciones, es imprescindible conocer tanto el sistema antiguo llamado CGSE y CGSM, como el MKSA, actualmente impuesto como sistema normalizado.

El sistema CGSE y CGSM parte de las siguientes unidades básicas: C - centímetro, G - gramo masa, S - segundo, E - unidad electrostática (statocoulomb) y M - masa magnética.

En el sistema MKSA racionalizado las unidades básicas son: M - metro, K - kilogramo masa, S - segundo y, como unidad eléctrica básica, A - amperio.

La primera normalización de las unidades eléctricas se llevó a cabo en la Conferencia Internacional de Electrotecnia en el año 1908 en Londres. En esa ocasión se determinaron y definieron las siguientes unidades eléctricas básicas:

1 amperio internacional ($1 A_{int}$). Es una corriente de intensidad constante que, al circular por una solución de nitrato de plata ($AgNO_3$), deposita en un segundo 1,118 mg de plata de la solución.

1 ohmio internacional ($1 \Omega_{int}$). Es una resistencia que ofrece una columna de mercurio de sección constante de 1 mm^2 , de 106,3 cm de longitud y cuya masa es de 14,4521 g, hallándose a $0^\circ C$.

Las otras unidades fueron determinadas por las leyes de la Física. En el año 1911, se estableció la unidad de 1 voltio internacional, aprovechando una fuerza electromotriz de valor muy constante de la pila Weston. Esta pila se describirá más adelante en el párrafo que trata de patrones.

En el año 1946, la Comisión Internacional estableció otras definiciones de las unidades y que se basan sobre el sistema ya mencionado MKSA. Estas unidades son las siguientes:

1 amperio absoluto ($1 A_{abs}$). Es la corriente invariable que, circulando por dos conductores paralelos de longitud infinita, de sección circular despreciable y separados por una distancia de 1 metro en el vacío, produce sobre cada conductor una fuerza de 2×10^{-7} Newton por metro de longitud. La figura I-1 ilustra esta definición.

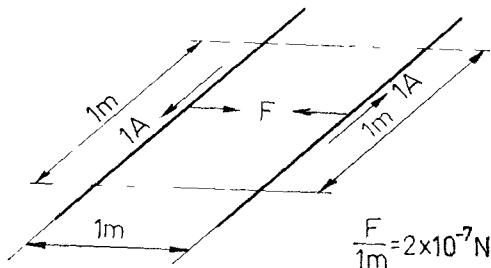


Figura I-1.

1 voltio absoluto ($1 V_{abs}$). Es la diferencia de potenciales que existe entre dos puntos de un conductor eléctrico recorrido por una corriente de 1 amperio, cuando la potencia disipada por el conductor entre esos dos puntos es igual a 1 vatio (fig. I-2).

1 ohmio absoluto ($1 \Omega_{abs}$). Es la resistencia de un trozo de conductor en el cual una diferencia de potenciales de 1 V aplicada entre sus extremos produce una intensidad de corriente de 1 amperio absoluto (fig. I-3).

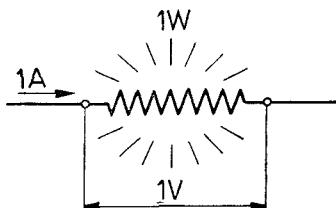


Figura I-2.

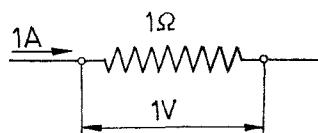


Figura I-3.

La aprobación definitiva del Sistema Internacional de Unidades de Medida fue hecha por la XI Comisión General de Medidas en el año 1968, utilizándose de forma generalizada desde esa fecha.

Comparando las unidades internacionales con las absolutas tenemos:

$$\begin{aligned} 1 \text{ amperio internacional} &= 0,99985 \text{ amperio absoluto} \\ 1 \text{ voltio internacional} &= 1,00034 \text{ voltio absoluto.} \\ 1 \text{ ohmio internacional} &= 1,00049 \text{ ohmio absoluto} \end{aligned}$$

En la tabla I-1 están resumidas las unidades de las magnitudes eléctricas en el sistema MKSA, que se emplearán en este libro. En la tabla I-2 se relacionan los prefijos.

Patrones

Los patrones sirven para establecer y mantener las magnitudes de las distintas unidades, conservando estas magnitudes en su forma física. Reconocemos básicamente dos tipos de patrones: primarios y secundarios. El término "patrón primario" significa que se trata de un patrón utilizado como inicial de referencia, con el cual deben ser comparados los otros (secundarios) directa o indirectamente. Lógicamente, los únicos patrones realmente primarios son los que representan a las

TABLA I-1

M A G N I T U D		U N I D A D M K S A	
Denominación	Símbolo	Denomin.	Símb.
Intensidad de corriente eléctrica	I, i	Amperio	A
Tensión eléctrica, diferencia de potenciales	U, u	Voltio	V
Fuerza electromotriz	E, e, fem	Voltio	V
Resistencia eléctrica	R, r	Ohmio	Ω
Resistencia específica o resistividad	ρ		$\Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$
Conductancia eléctrica	G	Siemens	S
Conductancia específica o conductividad	γ		S/m
Carga eléctrica o cantidad de electricidad	Q, q	Coulombio	C
Inductancia propia	L	Henrio	H
Inductancia mutua	M	Henrio	H
Capacidad	C	Faradio	F
Frecuencia	f	Hertzio	Hz
Potencia eléctrica	P, p	Vatio	W
Energía eléctrica o trabajo	A	Vatiohora	Wh

unidades fundamentales, pues los patrones de las unidades derivadas no deberían ser considerados como primarios.

Los detalles de construcción y funcionamiento de los aparatos utilizados como patrones primarios de las unidades fundamentales se desvían del objeto de este manual. Por tanto, nos limitaremos a la descripción de los patrones que se utilizan en las mediciones tecnológicas.

Los patrones utilizados en laboratorios industriales son de cons-

TABLA I-2
Prefijos más comúnmente usados

<i>Denominación</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>	<i>Ejemplos</i>
Mega	M	10^6	$M\Omega$ (Megohmio)
Kilo	k	10^3	kW, kV, kΩ
Mili	m	10^{-3}	mA, mV, mH
Micro	μ	10^{-6}	μA , μF , μV
Milimicro (nano)	$m\mu$	10^{-9}	
Micromicro	$\mu\mu$	10^{-12}	
Pico	p	10^{-12}	pF

trucción relativamente simple y, por ende, son económicos. Su característica más importante es la estabilidad del valor nominal. Los patrones más utilizados en tecnología son: patrones de resistencia eléctrica, de diferencia de potenciales, patrones de inductancia propia y mutua y patrones de capacidad.

Patrón de diferencia de potenciales

El patrón de diferencia de potenciales, o sea, de tensión, es una pila voltaica tal que pueda mantener durante varios años una fuerza electromotriz constante. Se solían utilizar varios tipos de pilas, pero finalmente se aprobó, en calidad de pila patrón, la pila Weston. Existen dos tipos de esta pila: la denominada *normal* y la *standard*. Los materiales empleados y su construcción en ambos tipos son los mismos, y la única diferencia consiste en el grado de saturación del electrolito compuesto por sulfato de cadmio ($CdSO_4$). La pila *normal* trabaja con el electrolito saturado y, por tanto, contiene exceso de cristales; en cambio, el electrolito de la pila *standard* se satura a la temperatura de 4 °C.

La pila Weston fue ideada por Weston en el año 1892. Consiste

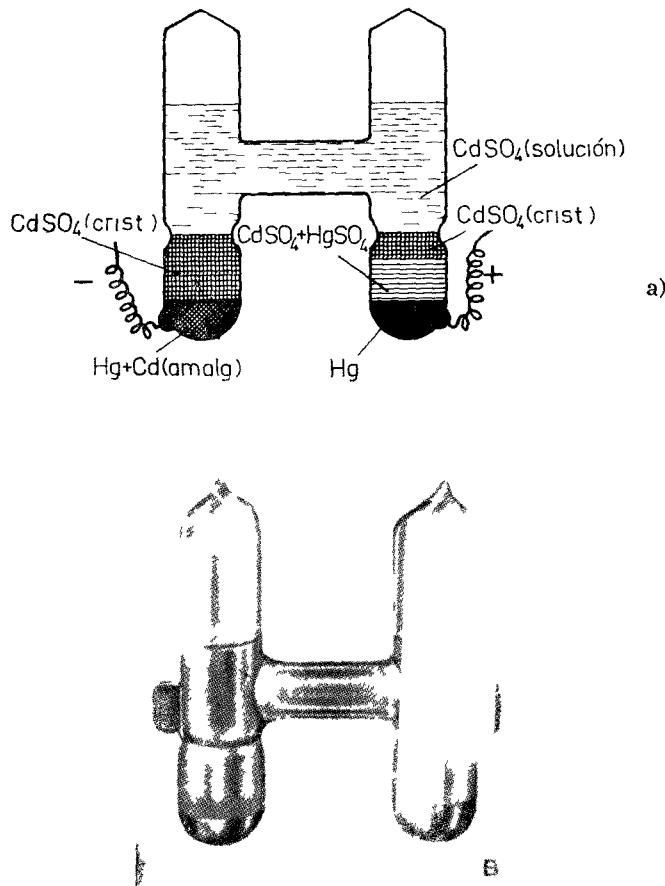


Figura I-4.

en un recipiente de vidrio en forma de H (fig. I-4a). En los brazos inferiores están introducidos dos alambres de platino que conectan con los polos de la pila. El polo positivo de la pila está constituido por el mercurio (Hg) y el polo negativo por la amalgama de Cadmio ($\text{Cd} + \text{Hg}$). El porcentaje de Cadmio en la amalgama es de 10 %. Como electrolito actúa la solución de sulfato de cadmio (CdSO_4). En la pila normal hay una capa de cristales de sulfato de cadmio encima de los elementos que constituyen los polos. Una pasta compuesta de sulfato de cadmio y de sulfato de mercurio ($\text{CdSO}_4 + \text{HgSO}_4$) actúa en calidad de despolarizador. El recipiente herméticamente sellado (fig. I-4b) está

colocado en una caja provista de sus correspondientes terminales. La figura I-5 muestra una pila patrón de fabricación francesa, marca AOIP.

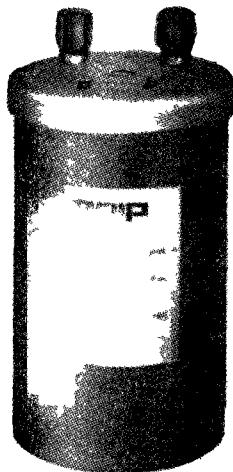


Figura I-5.

Características eléctricas de la pila Weston saturada

FUERZA ELECTROMOTRIZ

$E = 1,0187 \text{ V}_{\text{abs}}$ a los 20°C . Este valor oscila según la marca del fabricante entre 1,0184 y 1,0189 voltios absolutos.

COEFICIENTE DE TEMPERATURA DE LA FUERZA ELECTROMOTRIZ

Este coeficiente varía con la temperatura. Su valor es aproximadamente de $40 \mu\text{V}$ por grado centígrado, cuando la pila trabaja a temperaturas comprendidas entre 10 y 25°C .

RESISTENCIA INTERNA DE LA PILA

La resistencia interna depende de la capacidad. Por ejemplo, las pilas patrón de procedencia francesa tienen una resistencia interna de 500Ω , y las de procedencia inglesa llegan a tener hasta 1000Ω . En general, es del orden de centenares de ohmios.

INTENSIDAD ADMISIBLE DE CORRIENTE DE DESCARGA

Se considera que la intensidad máxima de $170 \mu\text{A}$ durante dos segundos no afecta la pila. Hay que tener siempre en cuenta que de-

bido a la alta resistencia interna, cualquier intensidad mayor que la indicada producirá una caída de tensión apreciable en los bornes de la pila. Por tanto, la intensidad de descarga debe ser mínima. La pila nunca debe ser cortocircuitada, y en el caso que esto ocurra se debe dejar la pila en reposo durante un período de 24 horas para su regeneración.

Empleo de la pila Weston

Principalmente se utiliza en la calibración de potenciómetros y mediciones de fuerza electromotriz en circuitos de compensación.

Patrones de resistencias

Para los patrones de resistencia, se emplean resistores de materiales resitivos especiales, muy cuidadosamente confeccionados y contrastados con la exactitud requerida por la clase de exactitud del patrón en cuestión. La clase de exactitud del patrón está determinada por la diferencia entre el valor real y el valor nominal, expresada en % del valor nominal. Los patrones de resistencia deben caracterizarse por:

1. Constancia del valor de su resistencia.
2. Bajo coeficiente de temperatura.
3. Bajo valor de fuerza termoeléctrica con cobre.
4. Carencia de inductancia.
5. Alta resistencia mecánica y térmica.

El patrón está provisto de bornes que pueden ser de cobre o de bronce, y por tanto existe la posibilidad de generación de fuerza electromotriz termoeléctrica que puede alterar los resultados de las mediciones. En consecuencia, los patrones destinados para circuitos de corriente continua deben ser confeccionados con materiales cuya fuerza termoeléctrica con cobre sea mínima. En cambio, en los patrones que trabajan en circuitos de corriente alterna, el valor de la fuerza termoeléctrica carece de importancia, pero es muy importante que estos patrones no acusen inductancia ni capacidad eléctrica alguna. El campo magnético variable, generado por la corriente alterna en las espiras de alambre resistivo, produce como efecto una resistencia en paralelo con capacidades. En este caso, la resistencia patrón actúa como resistencia combinada: óhmica-inductiva y capacitiva. También en este tipo de patrones debe evitarse la generación de corrientes parásitas.

Los materiales que más se emplean en la confección de patrones son *manganina* y *constantan*. La manganina es una aleación de 84 % Cu, 12 % Mn y 4 % Ni. Sus características más importantes son las siguientes:

Resistencia específica $\rho = 0,42 \dots 0,44 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ a 20 °C.

Coeficiente de temperatura $\alpha = 1 \times 10^{-5}/1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Fuerza termoeléctrica con cobre $e_t = 1,5 \dots 3,0 \mu\text{V}/1 \text{ }^\circ\text{C}$.

La manganina es muy usada, porque tratada y envejecida debidamente cumple con gran aproximación las condiciones requeridas. No debe trabajar en temperaturas superiores a 200 °C, pues a altas temperaturas se evapora el manganeso de las capas exteriores del conductor.

El constantan es también una aleación de cobre, níquel y maganeso, con las siguientes proporciones: 58 % Cu, 41 % Ni y 1 % Mn. Sus características son las siguientes:

Resistencia específica $\rho = 0,48 \dots 0,50 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ a 20 °C.

Coeficiente de temperatura $\alpha = 0,5 \times 10^{-5}/1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Fuerza termoeléctrica $e_t = 37,5 \dots 42,4 \mu\text{V}/1 \text{ }^\circ\text{C}$ (con cobre).

Su temperatura de trabajo no debe exceder los 70 °C aproximadamente. Debido al alto valor de la fuerza termoeléctrica con cobre, sólo se utiliza en la confección de patrones para corriente alterna.

Cuando se confeccionan patrones para circuitos de corriente continua, se emplea la manganina como material resistivo debido a su baja fuerza termoeléctrica con el cobre. En la confección de patrones para corriente alterna se puede utilizar constantan, pero como estos patrones no deben acusar inductancia, debe prestarse mucha atención al tipo de bobinado y a su forma. El bobinado *bifilar* es el más usado (fig. I-6). Este bobinado consiste en bobinar el carrete del resistor

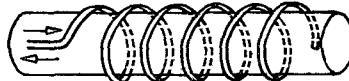


Figura I-6.

con dos alambres paralelos, de manera que, al terminar el arrollamiento, se forma un largo lazo. Los flujos magnéticos generados por las corrientes de sentido opuesto se compensan. El inconveniente de este tipo de bobinado es su relativamente alta capacidad eléctrica, ya que ésta depende de la cantidad de cargas. La carga eléctrica es proporcional a la longitud del conductor y a la diferencia de potenciales

que se produce entre dos conductores paralelos, e inversamente proporcional a la distancia entre ellos. Precisamente estas propiedades que favorecen la generación de cargas eléctricas aparecen en este tipo de bobinado. Por tanto, el bobinado bifilar se puede emplear en resistores cuyo bobinado es relativamente corto. En la práctica, se emplea en los patrones cuyo valor no sobrepasa 100Ω aproximadamente.

En la confección de patrones de resistencias mayores de 100Ω se emplea el sistema de bobinado de Chaperon (fig. I-7). Este arrolla-

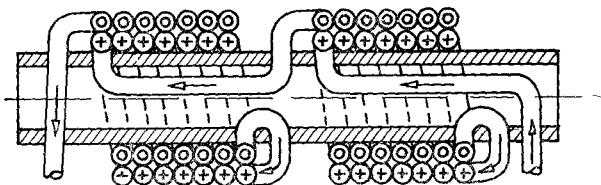


Figura I-7.

miento consiste en varias secciones bobinadas sobre un carrete cilíndrico. Cada una de las secciones está formada por dos capas de espiras de alambre resistivo, bobinadas en sentido contrario, por lo cual los flujos de ambas capas se anulan.

Los patrones de resistencia muy alta se confeccionan bobinando el alambre resistivo sobre finas placas de material aislante (fig. I-8). Estas placas pueden ser de mica, mikarta, baquelita o ebonita. En este tipo de resistores la inductancia es muy baja debido a que las corrientes de ambos lados de la placa tienen sentido opuesto. Cuando el principio y el fin del arrollamiento se coloque en extremos

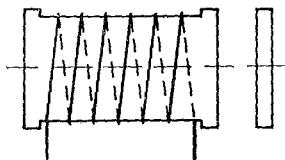


Figura I-8.

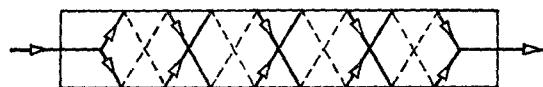


Figura I-9.

opuestos de la placa, también la capacidad eléctrica será despreciable. La figura I-9 muestra una variante de construcción de un resistor de alto valor bobinado sobre la placa. En este sistema, llamado Ayrton-Mather, el alambre resistivo se compone de dos ramas paralelas que se cruzan.

Los patrones de resistencia pueden ser fijos o regulables. Un patrón fijo representa una unidad, su fracción o su múltiplo, por ejemplo: 0,01; 0,1; 1; 10; 1.000 Ω . Estos patrones fijos se construyen de dos o de cuatro terminales. Cuando se trata de valores de resistencia superiores a 10 Ω , se pueden usar los patrones de dos terminales; tratándose de resistencias inferiores a 1 ohmio, se recomienda emplear patrones de cuatro bornes. En los circuitos donde se miden y comparan valores bajos de resistencia, circulan, por lo general, intensidades altas y, por tanto, en los puntos de conexión con las fuentes de alimentación (bornes) se pueden producir caídas de tensión originadas por la resistencia de los bornes. (Ejemplo: puente Thompson.) Para evitar errores producidos por estos efectos, el patrón de cuatro bornes tiene dos bornes principales I para conectar con la corriente y, otros E sobre los cuales se toma el valor de resistencia. La figura I-10 muestra la construcción de un patrón de resistencia de cuatro terminales, confecionado y ajustado en sus dimensiones a las normas DIN; la figura I-11 muestra un patrón de dos bornes. En este último ejemplo, la conexión

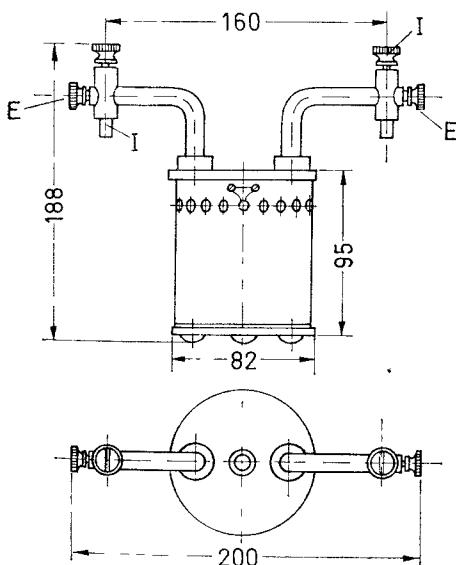
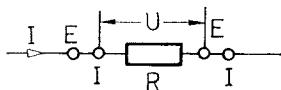


Figura I-10.

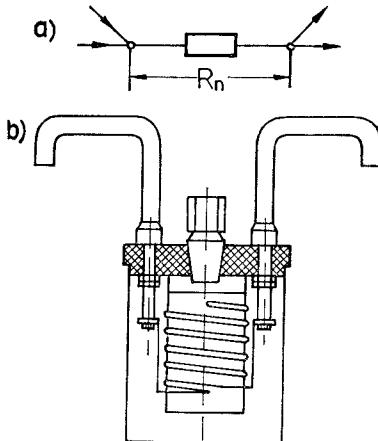


Figura I-11.

del patrón con el circuito se efectúa mediante conectores de mercurio (no mostrados en la figura), con el fin de disminuir la resistencia de contacto. Las figuras I-12 y I-13 muestran fotografías de patrones de diferentes procedencias. En la figura I-12 se ve el patrón fabricado por la AOIP (Francia), y en la I-13 por YOKOGAWA (Japón). La construcción de los patrones de alta clase de exactitud permite sumergir el resistor en un baño de aceite o de queroseno para mantenerlo a la temperatura constante.

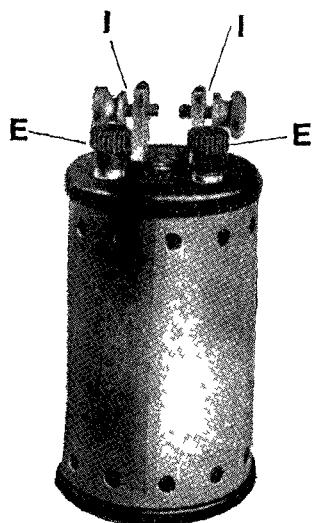


Figura I-12.

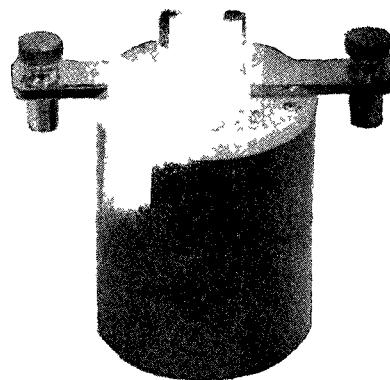


Figura I-13.

Según su clase de exactitud, los patrones se dividen de manera similar a los instrumentos de medición. Sin embargo, hasta la fecha no se han normalizado las clases internacionales de exactitud de patrones. Las fábricas establecen la clase de tolerancia y, en consecuencia, la exactitud de los patrones. "Tolerancia" es la máxima diferencia que puede darse entre el valor nominal del patrón y su valor real expresado en % del valor nominal.

Para orientación del lector se resumen en las tablas I-3 y I-4, los valores y tolerancias de los patrones más corrientes fabricados por dos diferentes firmas. La tabla I-3 se refiere al patrón mostrado en la figura I-12 y la tabla I-4 al de la figura I-13.

En la figura I-14 se ven cuatro patrones: de $0,1\ \Omega$; de $1\ \Omega$; de $10\ \Omega$ y de $100\ \Omega$.

TABLA I-3

Resistencia nominal Ω_{abs}	Intensidad admisible A_{abs}	Tolerancia %
0,001	50	$\pm 0,05$
0,01	15	$\pm 0,02$
0,1	5	$\pm 0,01$
1	1,5	$\pm 0,01$
10	0,5	$\pm 0,01$
100	0,15	$\pm 0,01$
1000	0,05	$\pm 0,01$

TABLA I-4

Resistencia nominal Ω_{abs}	Intensidad admisible A_{abs}	Tolerancia %
0,001	30	$\pm 0,01$
0,01	10	$\pm 0,01$
0,1	3	$\pm 0,01$
1	0,2	$\pm 0,001$
10	0,06	$\pm 0,001$
100	0,02	$\pm 0,005$
1000	0,006	$\pm 0,005$
10000	0,002	$\pm 0,005$

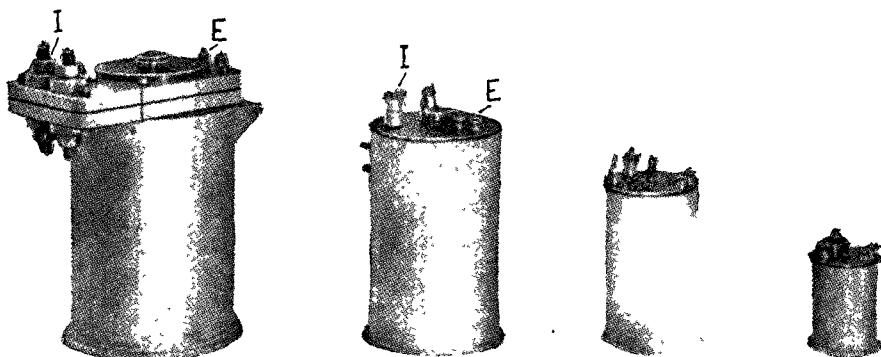


Figura I-14.

Los patrones de resistencia regulables son conjuntos de resistores fijos que se regulan (intervienen o no) mediante clavijas o llaves selectoras. Los patrones regulables con clavijas son más seguros y exactos, pero los regulados mediante llaves selectoras son más cómodos. La figura I-15 muestra el sistema de regulación por medio de clavijas. Las

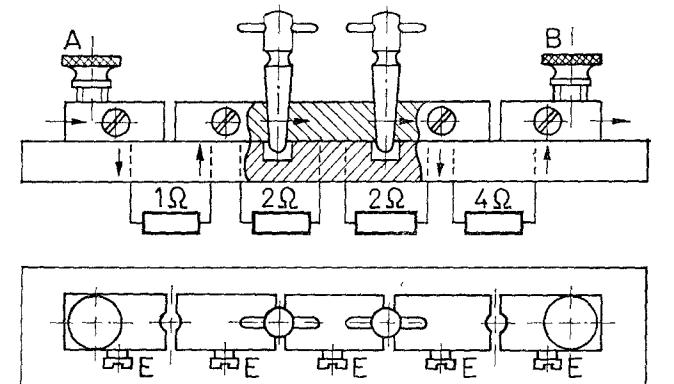


Figura I-15.

flechas señalan el sentido de circulación de la corriente entre los segmentos de los resistores. En el ejemplo de la figura I-15, dos resistores de 2Ω cada uno están cortocircuitados de manera que la resistencia total interesada entre los bornes A y B es $1 + 4 = 5\Omega$. En los costados de los bloques de bronce conectados con los resistores parciales se en-

cuentran los tornillos E que sirven como bornes de tensión igual que en el caso de los patrones fijos. La resistencia de contacto de dos bloques vecinos cortocircuitados por la clavija es del orden de $10^{-4} \Omega$. Por lo general se fabrican los patrones de clavija en 20 secciones. La figura I-16 muestra un ejemplo de este tipo de patrón, en el cual la resis-

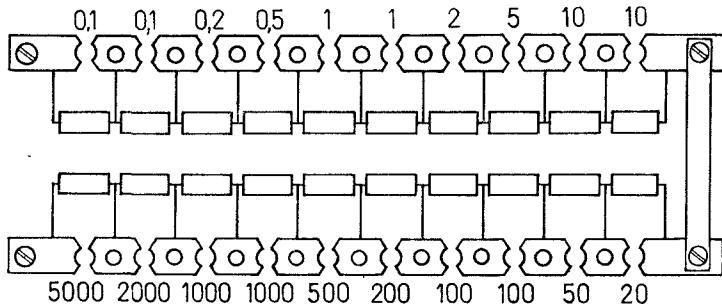


Figura I-16.

tencia total, al quitar todas las clavijas, es $9999,9 \Omega$. La figura I-17 es otro ejemplo del mismo tipo de patrón regulable. En éste, los resistores parciales, siendo de potencia relativamente grande (5 W), están bobinados de forma no inductiva (bifilar o de Chaperon) sobre carretes.

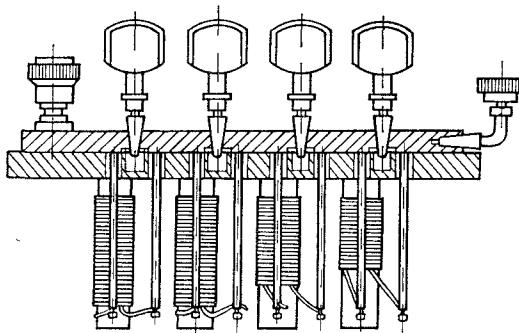


Figura I-17.

Mucho más cómoda es la regulación mediante llaves selectoras. La figura I-18 ilustra este sistema. El patrón regulable (en nuestro ejemplo) se compone de 5 secciones llamadas décadas por estar com-

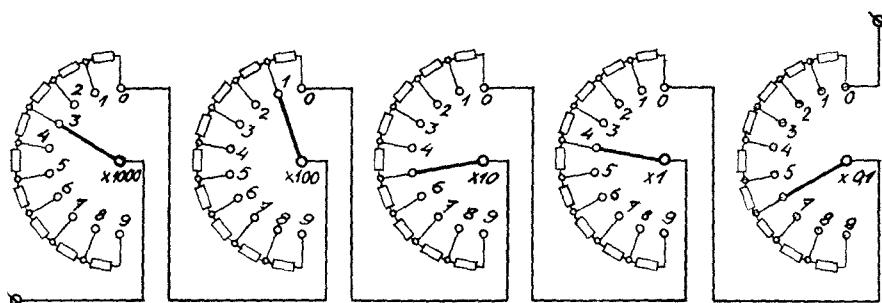


Figura I-18.

puestas de 10 resistores (11 posiciones del selector) o de 9 resistores (10 posiciones del selector). En nuestro ejemplo, la resistencia total del conjunto (todos los cursos en la posición nueve) es también 9999,9 Ω . El mantenimiento indispensable de este tipo de patrones regulables consiste en efectuar, frecuentemente, la limpieza de los contactos con alcohol u otro solvente especial, después de lo cual debe engrasarse con vaselina pura. La resistencia de contactos de llaves selectoras es un poco mayor que la de clavijas, siendo del orden de $10^{-3} \Omega$. También la presión entre los platino de los contactos debe ser ajustada a un valor comprendido entre 100 y 200 g. La exactitud de este tipo de patrones regulables está comprendida entre 0,02 a 0,2 %, según la clase y condiciones de trabajo del patrón (temperatura). Se estima que el valor total de la resistencia de los contactos en un patrón de 5 décadas estará comprendido entre 0,03 y 0,05 Ω . En la escala de cada década debe figurar el valor máximo de la corriente admisible para dicha década.

Los patrones previstos para trabajar en circuitos de corriente alterna se colocan en cajas metálicas provistas de un borne de conexión a tierra. La figura I-19 muestra un patrón regulable de 4 décadas, de 10 resistores cada una, siendo el valor total de resistencia del patrón 11110 Ω .

Patrones de inductancia

Se utilizan dos tipos de patrones de inductancia: patrones de inductancia propia L (autoinductancia), y patrones de inductancia mutua M . Antes de describir ambos tipos de patrones, definiremos la unidad de inductancia que se debe reproducir mediante ellos. Tanto la

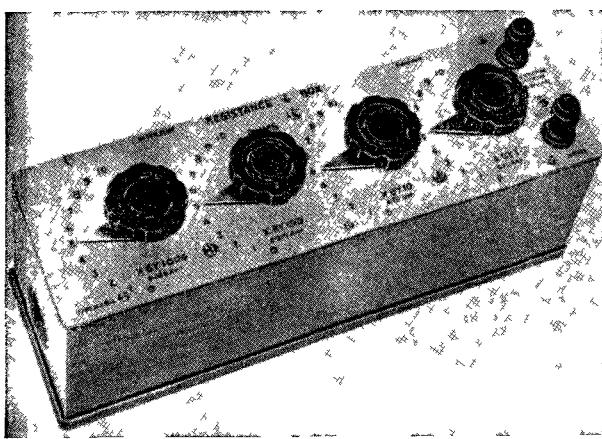


Figura I-19.

autoinductancia como la inductancia mutua se miden con la unidad de medida llamada "Henrio" (H), que se define de la siguiente manera:

a) Una bobina tiene la inductancia propia de 1 henrio cuando al variar la corriente en esta bobina, a razón de 1 amperio absoluto por segundo, se induce en ella una fuerza electromotriz de 1 voltio absoluto.

b) Entre dos bobinas acopladas magnéticamente existe una inductancia mutua de 1 henrio, cuando, al variar la corriente en una de las bobinas, a razón de 1 amperio absoluto por segundo, se induce en la otra una fuerza electromotriz de 1 voltio absoluto.

Los patrones de inductancia propia están formados por un arrollamiento en forma de bobina, el cual, al intercalarse en un circuito, reproduce el efecto inductivo correspondiente al valor nominal de la inductancia que representa. Los patrones de inductancia mutua están formados por dos arrollamientos acoplados magnéticamente, los cuales, al utilizarse en un circuito, reproducen el efecto de inducción mutua correspondiente al valor nominal de la inductancia mutua que representan en conjunto.

Los patrones de inductancia deben cumplir varios requisitos similares a los que rigen los patrones de resistencia. Estos requisitos son los siguientes:

1. Invariabilidad de la inductancia en el tiempo.
2. Bajo coeficiente de temperatura.

3. Baja influencia de la intensidad de corriente en el valor de la inductancia (en los patrones sin núcleo).
4. Poca influencia de la frecuencia en el valor de la inductancia, dentro del margen nominal de la frecuencia del patrón.
5. Bajo valor de la resistencia óhmica del arrollamiento en relación con el valor de la inductancia.

La confección de los patrones de inductancia se hace en base a un cálculo aproximado. Una vez confeccionada la bobina del patrón, se lo ajusta mediante mediciones a los valores deseados exactos.

El valor de la inductancia propia L de una bobina depende de su forma, de sus dimensiones y del medio por el cual atraviesa el flujo de inducción, producido por la corriente que circula por las espiras. La inductancia de una bobina cilíndrica, de " n " número de espiras, de sección activa " S ", de longitud " l ", cuyo núcleo tiene una permeabilidad " μ " se expresa:

$$L = \frac{\mu \cdot n^2 \cdot S}{l}$$

Los patrones de inductancia se utilizan sin núcleo ($\mu = 1$); por tanto, podemos calcular la inductancia de un patrón mediante la siguiente fórmula:

$$a) \quad L = 0,4 \cdot \pi \cdot \frac{n^2 \cdot S}{l} \cdot 10^{-8} = 1,256 \cdot \frac{n^2 \cdot S}{l} \cdot 10^{-8} \text{ henrios}$$

cuando S es en cm^2 y l en cm .

$$b) \quad L = 4 \cdot \pi \cdot \frac{n^2 \cdot S}{l} \cdot 10^{-7} = 12,56 \cdot \frac{n^2 \cdot S}{l} \cdot 10^{-7} \text{ henrios}$$

cuando S es en m^2 y l en m (MKSA).

Empleamos dos tipos de patrones de inductancia: 1) fijos —o de un valor solamente—, y 2) regulables —o de valor regulable. La figura I-20 muestra un patrón fijo de autoinductancia. Sobre el carrete 1 está bobinado el arrollamiento 2. El carrete debe ser de algún material aislante cuyo coeficiente de dilatación sea bajo; de esta manera se evita que la bobina varie sus dimensiones como consecuencia de la acción de la temperatura. Por lo general, se utiliza, como materia ideal para este fin, el mármol. Sin embargo, debido al elevado costo de la fabricación de estos carretes de mármol, frecuentemente se reemplaza por madera impregnada. Para disminuir errores por frecuencia se debe evitar la presencia de piezas metálicas. Los imprescindibles bornes de conexión deben estar colocados lejos del eje geométrico de la bobina. En el tipo de patrón de la figura I-20, el ajuste final presenta

el inconveniente de que para efectuarlo es necesario quitar o añadir espiras, con lo cual el ajuste se convierte en una tarea laboriosa y compleja. El ajuste final es mucho más cómodo en los patrones cuya construcción es la de la figura I-21. Este tipo de patrón está provisto de una pequeña bobina adicional de ajuste (2a), ubicada dentro de la bobina principal 2. La bobina 2a tiene una inductancia propia de valor

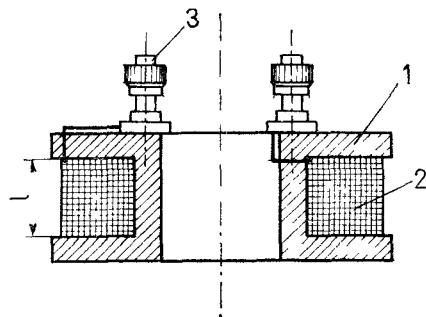


Figura I-20.

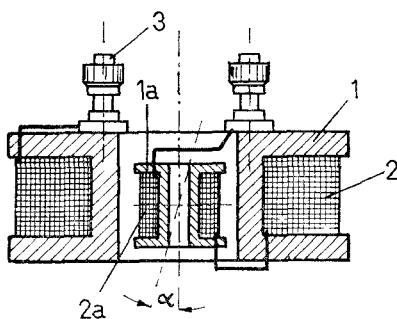


Figura I-21.

muy bajo, que no excede el 5 % del valor total del patrón. El ajuste final se efectúa cambiando la posición de la bobina interior 2a con respecto a la bobina principal 2. El valor resultante de la inductancia propia del conjunto se puede expresar

$$L = L_2 + L_{2a} \pm M_{2, 2a}$$

El valor de inductancia mutua depende de la posición de la bobina de ajuste 2a.

Para la mejor orientación de lector, en las tablas I-5 y I-6, se han agrupado los datos técnicos de algunos patrones de inductancia, fa-

TABLA I-5

Valor nominal H	Resist. en c.c. Ω	Intensidad admisible mA	Tolerancia a 1000 Hz %
0,1	30	400	1
1,0	320	125	1
5,0	1900	50	1

TABLA I-6

Valor nominal mH	Resist. en c.c. Ω	Intensidad admisible A	Tolerancia %
100	27	0,6	0,01 a 100 Hz
200	47	0,4	0,02 a 100 Hz
1000	110	0,2	0,4 a 100 Hz

bricados por dos firmas especializadas y en la figura I-22 se muestra la vista exterior de este tipo de patrones.

Los patrones de inductancia regulables están formados por juegos de patrones fijos montados en cajas para formar conjuntos. La

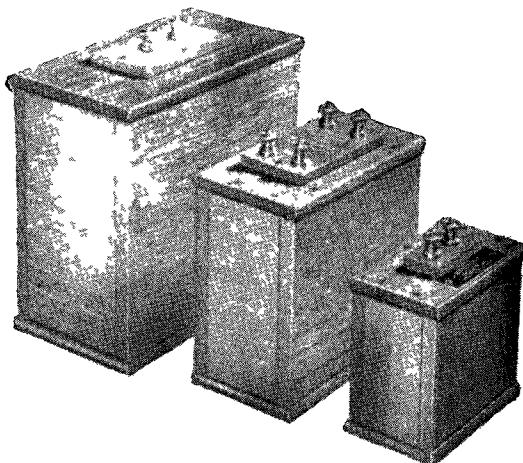


Figura I-22.

regulación se efectúa operándolos de manera similar como en los casos de los patrones regulables de resistencia: mediante clavijas o llaves selectoras.

En algunos circuitos de medición es conveniente mantener constante la resistencia óhmica intercalada en el circuito a pesar de variar la inductancia patrón. Esta condición se obtiene cuando, al quitar una inductancia del circuito, simultáneamente se intercala un resistor de igual valor que la resistencia óhmica de la inductancia quita-

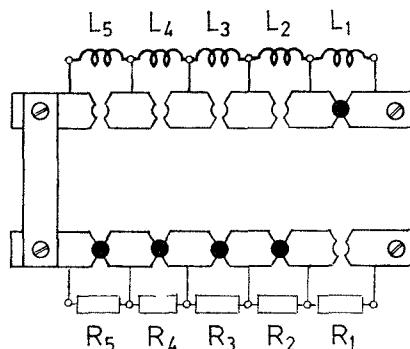


Figura I-23.

da. La figura I-23 muestra un patrón de inductancia, regulable mediante clavijas dispuestas de tal manera que facilitan la operación mencionada. En este ejemplo las inductancias L_1 , L_2 , L_3 , L_4 y L_5 están conectadas en serie y esta serie, a su vez, está conectada a las resistencias R_1 , R_2 , R_3 , R_4 y R_5 igualmente unidas en serie. La resistencia R_1 es del mismo valor que la resistencia óhmica de la inductancia L_1 ; la resistencia R_2 es igual a la resistencia óhmica de L_2 y así sucesivamente. Para quitar del circuito la inductancia L_1 se la cortocircuita mediante la misma clavija utilizada para cortocircuitar la resistencia R_1 , quedando intercalada la resistencia en lugar de la inductancia correspondiente.

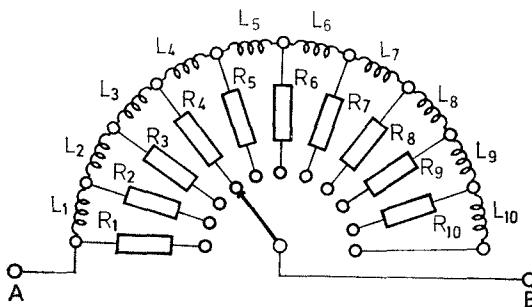


Figura I-24.

La figura I-24 muestra el sistema de regulación mediante llave selectora. En este ejemplo, todas las inductancias son iguales ($L_1 = L_2 = L_3 = \dots = L_{10}$); en cambio, las resistencias óhmicas R_1 , R_2 , \dots , R_{10}

tienen valores que van en disminución progresiva. Cuando tenemos la llave selectora en la posición 1, entre los bornes *A* y *B* no actúa inductancia alguna y, en cambio, ha quedado conectada la resistencia R_1 , cuyo valor es igual a la suma de resistencias óhmicas de todas las inductancias $L_1 \dots L_{10}$.

Si pasamos a la posición 2 del selector, la inductancia L_1 y la resistencia R_2 quedan intercaladas entre los bornes *A* y *B*. El valor de la R_2 es igual a la suma de los valores de las resistencias óhmicas de las inductancias $L_2 \dots L_{10}$.

Pasando a la posición 3 del selector, hemos intercalado las inductancias $L_1 + L_2$ y la resistencia R_3 . La resistencia R_3 equivale al valor de las restantes resistencias óhmicas de inductancias, o sea, $L_3 \dots L_{10}$.

En la posición 11 del selector estarán intercaladas todas las inductancias sin ninguna resistencia en sustitución de sus resistencias óhmicas.

Los patrones de inductancia mutua se fabrican en forma de dos arrollamientos 2 y 3 (fig. I-25) bobinados sobre un carrete y separa-

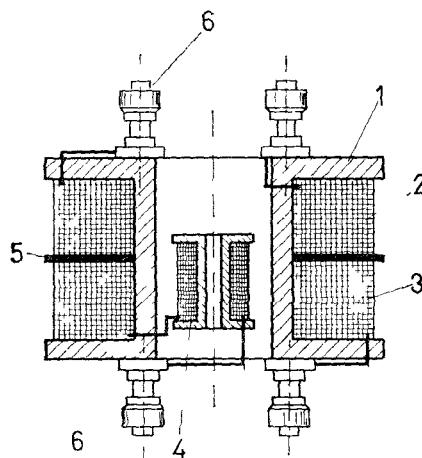


Figura I-25.

dos por un separador 5, de poco espesor. Dentro del carrete 1 está colocada la bobina adicional de ajuste 4, conectada en serie con cualquiera de las dos bobinas (2 o 3). La posición de la bobina de ajuste se determina durante la medición y ajuste finales.

Los patrones construidos en forma de variómetro resultan muy

cómodos en el uso. El patrón variométrico se puede utilizar como patrón de inductancia propia o como patrón de inductancia mutua según la conexión empleada —y en ambos casos puede utilizarse como patrón regulable. La figura I-26 muestra un patrón variométrico que consiste en dos bobinas: una fija 1, y la otra interior desplazable, 2. Cuando las bobinas están desplazadas 90° entre sí, la inductancia mutua es igual a cero, y cuando el ángulo entre ambas bobinas es mayor de 90° la inductancia mutua cambia de signo. Conectando en serie las dos bobinas (fija y móvil), el dispositivo se convierte en un patrón de autoinductancia regulable. En este caso, la autoinductancia tiene valores elegibles entre un valor mínimo y un valor máximo, lo cual se puede expresar

$$L_{\min} = L_{\text{fija}} + L_{\text{móvil}} - 2M_{\max} \quad \text{y} \quad L_{\max} = L_{\text{fija}} + L_{\text{móvil}} + 2M_{\max}$$

El variómetro patrón está provisto de cuatro bornes de conexión, primario y secundario, y de dos escalas, una con graduación de inductancia propia y la otra de inductancia mutua. Se estila construir ambas bobinas con la misma resistencia óhmica.

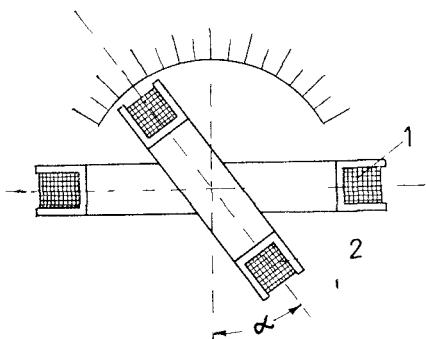


Figura I-26.

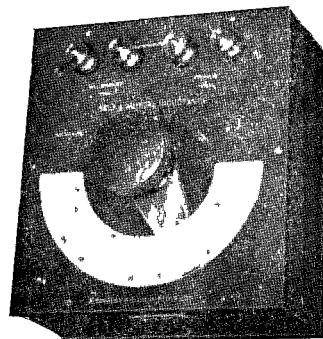


Figura I-27.

En la figura I-27 se aprecia la vista exterior de un patrón variométrico, cuyos datos técnicos son los que siguen:

Resistencia de la bobina primaria, fija $R_f = 42 \Omega$.

Resistencia de la bobina secundaria, móvil $R_m = 42 \Omega$.

El valor de la inductancia mutua de este patrón se puede regular entre $-22 \text{ mH} \dots 0 \dots +22 \text{ mH}$ y el valor de la inductancia propia, estando las dos bobinas conectadas en serie varía desde $L = 31 \text{ mH}$ hasta $L = 120 \text{ mH}$.

Patrones de capacidad

La unidad de medida de la capacidad eléctrica de un condensador es el *faradio*. Según las normas su definición es la siguiente: "Un faradio es la capacidad que tiene un condensador tal que, al estar sometido a una diferencia de potenciales de un voltio absoluto, se carga con una cantidad de electricidad igual a un coulombio".

En lugar de faradio, que es una unidad muy grande, se usan más frecuentemente sus fracciones, a saber: 1 microfaradio ($1 \mu\text{F} = 1\text{F} \cdot 10^{-6}$) o 1 micromicrofaradio ($1 \mu\mu\text{F} = 1\text{F} \cdot 10^{-12}$), denominado también 1 picofaradio (pF).

Los patrones de capacidad son condensadores de alta calidad, que cumplen con varios requisitos similares a los que rigen para los patrones de resistencia y de inductancia. Estos requisitos son los siguientes:

1. Estabilidad de su capacidad.
2. Bajo coeficiente de temperatura.
3. Poca influencia de la frecuencia en el valor de la capacidad.
4. Ángulo de pérdidas δ ínfimo.
5. Dieléctrico del condensador de muy alta resistencia.

La fórmula para calcular la capacidad de un condensador plano, que en la práctica resulta más conveniente, es la siguiente

$$C = 0,8856 \cdot 10^{-7} \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d} \quad \text{microfaradios. } (\mu\text{F})$$

donde

$0,8856 \cdot 10^{-7}$ es la denominada constante dieléctrica del vacío ε_0
 ε_r es la constante dieléctrica relativa del dieléctrico

(para el aire $\varepsilon_r = 1$)

S es la superficie de una placa del condensador (cm^2)

d es el espesor del dieléctrico (figura I-28) (cm)

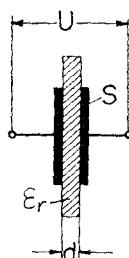


Figura I-28.

Como es sabido, la calidad de un condensador se constata midiendo el ángulo δ , denominado "ángulo de pérdidas". Este ángulo es la diferencia entre 90° y el ángulo de desfase φ , el cual está formado por

los vectores de la tensión U y de la intensidad I y es producido por el condensador que se haya conectado a la corriente alterna. La figura I-29 a y b muestra los diagramas vectoriales del condensador con sus circuitos equivalentes.

Suponiendo el caso de un condensador ideal, el ángulo φ es 90° y, en consecuencia, $\delta = 0$. El valor del ángulo δ depende de la calidad y especialmente de la resistencia óhmica del dieléctrico empleado en la fabricación del condensador.

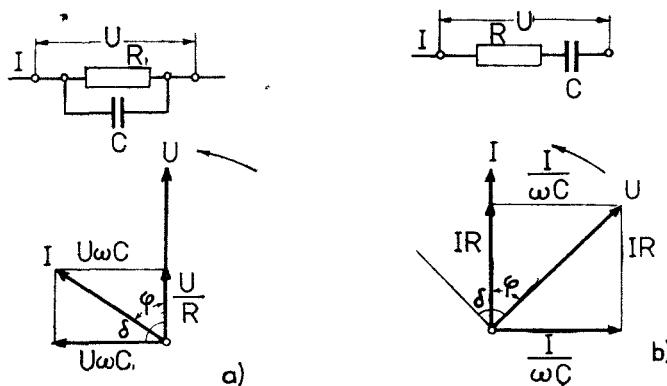


Figura I-29.

El condensador que, por sus características, más se acerca al ideal es el condensador de aire. Debido al bajo valor de la constante dieléctrica del aire, este tipo de condensador sirve como patrón sólo para capacidades pequeñas, pues para capacidades medianas y grandes el patrón resultaría demasiado voluminoso y pesado. En consecuencia, los patrones fijos de capacidad a base de condensadores con dieléctrico de aire, no se fabrican más que para los valores muy reducidos, o sea, comprendidos entre $0,001 \mu\text{F}$ y $0,01 \mu\text{F}$. Los patrones de capacidad de aire, regulables, se emplean para las capacidades más pequeñas aún. En estos patrones de capacidad, de valores tan pequeños, las capacidades de algunos elementos metálicos empleados en la construcción del patrón, se suman o restan a la capacidad del patrón. Estas capacidades adicionales dependen de la ubicación del condensador patrón con respecto a objetos exteriores. La anulación de la influencia de estas capacidades adicionales, se obtiene protegiendo al patrón con un blin-

daje que se conecta a tierra durante el uso. La figura I-30 muestra el esquema de un condensador patrón de 3 bornes con blindaje. El patrón de la figura está compuesto de tres condensadores C_1 , C_2 y C_3 . Cuando el borne O está conectado al borne B , la capacidad resultante del patrón es

$$C_p = C_1 + C_2$$

y cuando el borne O está conectado al borne A , la capacidad será:

$$C_p = C_1 + C_3$$

La figura I-31 muestra la fotografía de un patrón de este tipo de fabricación suiza.

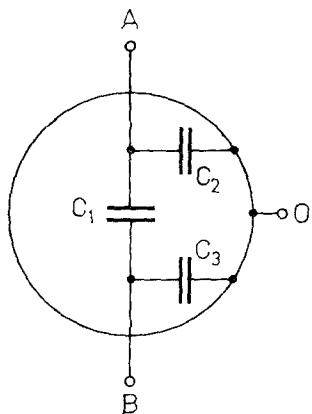


Figura I-30.

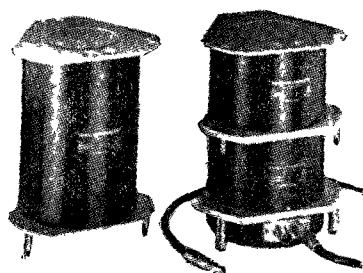


Figura I-31.

Otro tipo de condensadores que se emplean para patrones de capacidad en metrología eléctrica, son los condensadores con dieléctrico de mica, papel o poliéster. Este tipo de condensador es inferior al de aire, debido a que tiene un ángulo de pérdidas más grande y su tensión de trabajo es inferior, pero en proporción a su capacidad es de tamaño más reducido. En la tabla I-7 hemos agrupado datos comparativos de los tres tipos de condensadores patrón: de aire, de mica y de otros dielectricos. En la foto de la figura I-32 se ve un patrón-condensador de mica, de valor fijo, de 1 μF y 1 % de precisión.

Se usan tres tipos de patrones regulables. Cuando se trata de capacidades pequeñas se emplean condensadores de aire variables, similares en su construcción a los condensadores utilizados en radiotrans-

TABLA I-7

<i>Condensador patrón</i>	<i>Dieléctrico: Aire</i>	<i>Dieléctrico: Mica</i>	<i>Dieléctrico: Papel, Poliéster</i>
Valores fabricados μF	0,0001 a 0,01	0,001 a 1,0	0,001 a 1,0
Precisión (tolerancia) %	$\pm 0,01$ a 0,02	$\pm 0,03$ a 0,1	$\pm 1,0$ a 10,0
Angulo de pérdidas $\text{tg } \delta$	$1 \cdot 10^{-5}$ ó menos	$1 \cdot 10^{-4}$ ó más	$1 \cdot 10^{-3}$ ó más
Tensión máx. de trabajo V	2000	500	250

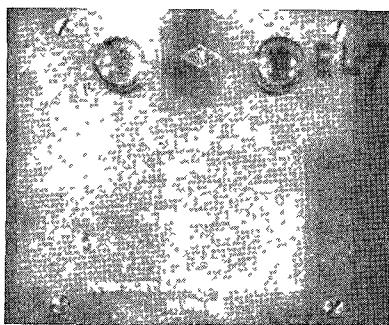


Figura I-32.

mismos, pero contrastados y provistos de una escala. La figura I-33 muestra un patrón de este tipo, de fabricación inglesa. En la figura I-34 se puede apreciar un tipo de escala uniforme —característica muy conveniente desde el punto de vista de la metrología.

La regulación de los patrones de capacidad de valor mediano o grande, se efectúa en forma similar que en el caso de la regulación de los patrones de resistencia y de inductancia, es decir, por medio de clavijas o llaves selectoras. Para obtener la suma de capacidades se las conecta en paralelo; en cambio, la suma de resistencias o

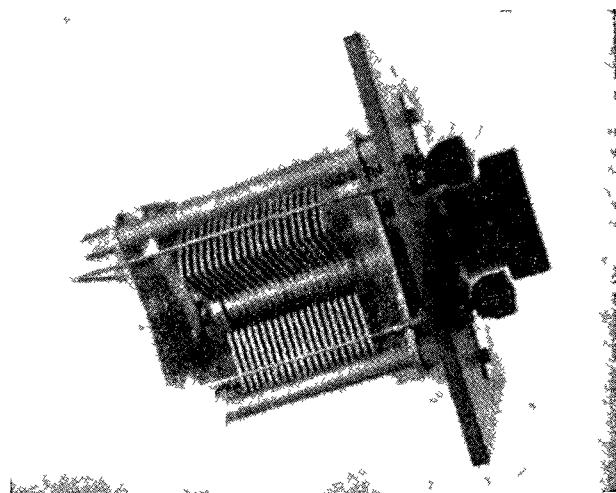


Figura I-33.

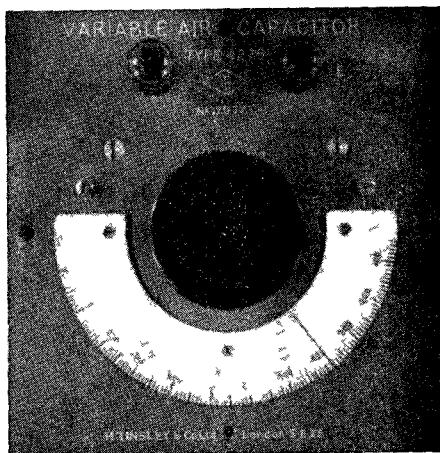


Figura I-34.

de inductancias se obtiene conectándolas en serie. De todo esto surge como consecuencia, el que haya diferencia en la manera de operar las clavijas y en la construcción de las llaves selectoras en el caso de

patrones de capacidad. La figura I-35 ilustra un patrón de capacidad regulable mediante clavijas. Nótese que en este tipo de patrón las capacidades parciales se van sumando a medida que se van colocando las clavijas en sus respectivas hembras. La capacidad total del patrón en el ejemplo de la figura, una vez colocadas todas las cla-

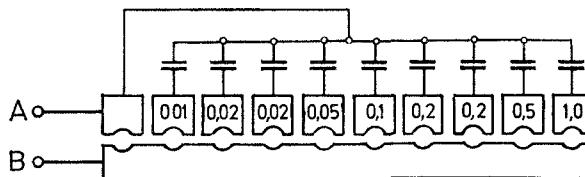


Figura I-35.

vijas, es de $2.1 \mu\text{F}$. En los casos de patrones de resistencia, las resistencias se suman a medida que se van quitando las clavijas de sus hembras, o sea, a la inversa. La figura I-36 muestra el sistema de regulación mediante llave selectora. Pasando el rotor del selector por los puntos numerados que corresponden a los condensadores parciales,

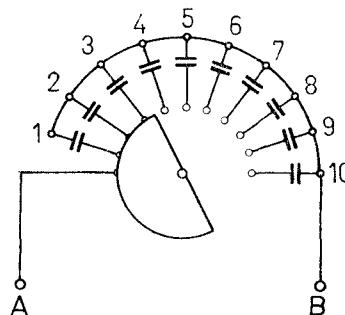


Figura I-36.

tenemos que, en la posición 10, todos los condensadores parciales ubicados entre los bornes A y B, estarán conectados entre sí en paralelo. Este sistema permite construir patrones en década —sistema parecido al de las resistencias.

La figura I-37 muestra dos tipos de patrones en década. El patrón de la figura I-37a tiene la capacidad total de $1.11 \mu\text{F}$. La primera década se regula en forma escalonada por etapas de $0.001 \mu\text{F}$, la se-

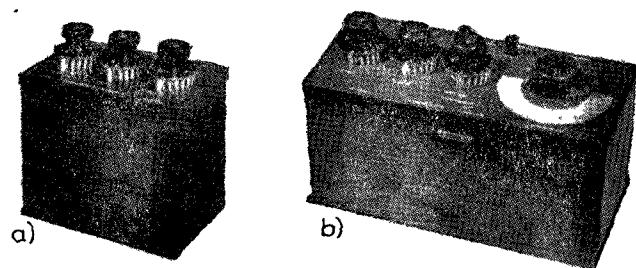


Figura I-37.

gunda por etapas de $0,01 \mu\text{F}$ y la tercera por $0,1 \mu\text{F}$. El patrón de la figura I-37b está adicionalmente provisto de un condensador variable de aire, que permite un ajuste más preciso. La precisión de los patrones vistos en la figura es del orden de 3 %.

Capítulo II

REGULACION DE TENSIONES E INTENSIDADES EN CIRCUITOS DE MEDICION

Un circuito de medición es un circuito utilizado para efectuar mediciones de magnitudes eléctricas. Algunas veces, es necesario montar un circuito de medición con el exclusivo objeto de realizar las mediciones; en cambio, otras veces, un circuito ya existente puede utilizarse para realizarlas.

Un circuito construido con el único propósito de efectuar mediciones, se compone de: 1. Fuente de energía. 2. Instrumentos de medición y 3. Elementos de control. Estos últimos sirven para la regulación y ajuste de la tensión e intensidad requeridas para efectuar las mediciones. La regulación y afinación de estas dos magnitudes (tensión e intensidad) es de la máxima importancia para llevar a cabo el proceso de medición en el margen y con la exactitud requeridos. La elección del sistema de regulación y, en consecuencia, los aparatos y dispositivos utilizados dependen de varios datos que deben tomarse en cuenta:

1. La magnitud o magnitudes a medir y el método aplicado.
2. Tipo de alimentación requerida —corriente alterna o continua y su potencia.
3. El margen (o márgenes) de la tensión que se aplicará.
4. El margen (o márgenes) de la intensidad de corriente que se hará circular.
5. Tipos y características de instrumentos empleados.

En este capítulo nos ocuparemos de los problemas relacionados con los puntos 2, 3 y 4, los cuales pueden presentarse en cualquier circuito de medición.

Alimentación de circuitos de medición

ALIMENTACIÓN CON CORRIENTE CONTINUA

La principal característica de la fuente de corriente continua, para circuitos de medición, es la estabilidad de su fuerza electromotriz. Los mejores resultados se obtienen empleando para este fin acumuladores. Las pilas primarias (por ejemplo, las del tipo Leclanché) también presentan una estabilidad satisfactoria de su fuerza electromotriz, pero debido a su baja capacidad (en Ah), se utilizan para alimentar equipos portátiles.

Como es sabido, existen dos tipos de acumuladores más frecuentemente usados: 1, acumuladores de plomo-ácido, y 2, los alcalinos de hierro-níquel. Estos últimos son más duraderos que los de plomo y requieren menor mantenimiento. Su fuerza electromotriz es de 1,2 V aproximadamente. Sin embargo, al comparar las características de ambos tipos de acumuladores (fig. II-1), observamos que, durante la des-

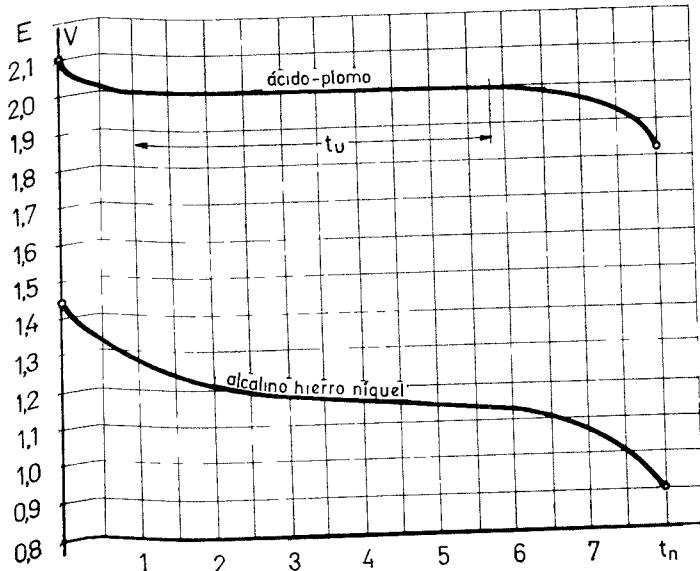


Figura II-1.

carga, el acumulador de plomo demuestra una estabilidad de su fuerza electromotriz muy satisfactoria, mientras que la fuerza electromotriz del acumulador alcalino varía de manera que no la podemos considerar

constante. El acumulador de plomo acusa una disminución de su fuerza electromotriz al principio y al final de la descarga, pero durante un largo período t_u su valor es constante. La fuerza electromotriz del acumulador alcalino disminuye constantemente durante todo el período de descarga y, por tanto, no la podemos considerar como constante.

Por esto, a pesar de sus inconvenientes (peso elevado, mantenimiento laborioso), el acumulador de plomo es muy recomendable para la alimentación de circuitos de medición, especialmente cuando se necesita corriente continua de tensión baja e intensidad elevada. Debe tenerse en cuenta, al emplear el acumulador de plomo, que la intensidad de corriente que suministra se estabiliza pasado cierto tiempo desde el instante de haberlo conectado en el circuito. La estabilidad máxima de corriente está asegurada cuando la intensidad de descarga es baja en relación a la corriente nominal de descarga del acumulador (10 horas). Podemos estar seguros de obtener la máxima estabilidad cuando la intensidad de descarga no sobrepase el 1 % de este valor nominal. Lógicamente esta precaución impone el empleo de acumuladores de gran capacidad.

Los generadores rotativos son otra clase de fuente de energía de corriente continua utilizada para la alimentación de circuitos de medición. En comparación con los acumuladores, los generadores rotativos presentan las siguientes ventajas:

1. La tensión es de fácil regulación.
2. Ocupan poco espacio.
3. No requieren mantenimiento constante.
4. Cuando son de potencia baja resultan fácilmente transportables.
5. No producen gases nocivos.

El único inconveniente en la utilización de esta clase de fuente de energía es que, debido al proceso de conmutación, no produce una corriente continua tan lineal como la que proviene de las fuentes químicas.

Entre los distintos tipos de generadores, los más convenientes para la alimentación de circuitos de medición son los generadores de excitación exterior, con estatores (polos) fabricados con material de baja remanencia. Su característica en vacío (fig. II-2) debe ser inclinada, para facilitar la regulación igualmente fina en todos los valores de las tensiones utilizadas.

Por lo general, en laboratorios de medición reconocidos, se emplean acumuladores para la alimentación de circuitos de intensidad (que son de baja resistencia y, en consecuencia, requieren tensiones

bajas). Además, los acumuladores pueden producir altas intensidades de corriente sin variaciones de tensión. Para alimentar los circuitos de tensión (que son de alta resistencia y requieren intensidades pequeñas) se emplean los generadores rotativos.

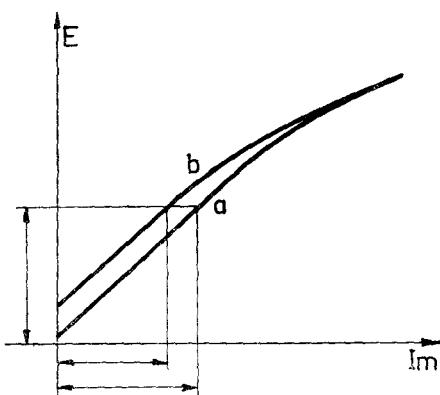


Figura II-2.

Una de las fuentes de corriente continua, de mayor uso en mediciones eléctricas, son los rectificadores. Estos, en comparación con las restantes fuentes de corriente continua (acumuladores, generadores), son de costo bajo, de fácil transporte y de manejo muy sencillo. Según la relación y potencia que tenga el transformador y según el tipo de diodo empleado en la construcción del rectificador, varían los márgenes de tensión y de intensidad. Su gran ventaja es la de permitir la combinación del rectificador con transformadores de relación variable (ver pág. 52). Para poder utilizarlos en circuitos de medición deben estar provistos de filtros y de estabilizadores para evitar los efectos de la pulsación y de las variaciones de tensión de la red. A continuación presentamos un ejemplo de características técnicas de un rectificador del tipo utilizado en laboratorios de medición.

Potencia: 200 VA.

Tensión de la red de alimentación: 220 V.

Frecuencia: 60 Hz.

Regulación de la tensión de c.c. entre 3 y 300 V.

Estabilidad de la tensión de c.c.: con las variaciones de la red hasta $\pm 10\% - 0,03\%$.

ALIMENTACIÓN CON CORRIENTE ALTERNA

La fuente de corriente alterna, destinada para alimentar los correspondientes circuitos de medición, tiene que cumplir con una serie de requisitos que son los siguientes:

1. Estabilidad de la fuerza electromotriz (tensión).
2. Estabilidad de la frecuencia.
3. Su onda de tensión debe ser sinusoidal y no deformada.

Para mediciones sencillas y mediciones del tipo industrial se utiliza la corriente alterna suministrada por la red pública común. En este caso se puede tener cierto grado de control sobre la estabilidad de la tensión y sobre la forma de la onda; sin embargo, la estabilidad de la frecuencia está fuera de control. Dado que, afortunadamente, las redes públicas tienen variaciones de frecuencia mínimas (1 %), la estabilidad de la frecuencia es satisfactoria para la mayoría de las mediciones efectuadas con corriente alterna. La estabilidad de la tensión se obtiene empleando estabilizadores (por ejemplo, del tipo ferro-resonante). Para mantener la onda sinusoidal no deformada se recomienda emplear todos los transformadores, estabilizadores, etc., construidos con núcleo de baja inducción magnética.

En laboratorios especialmente dedicados a las mediciones (por ejemplo, laboratorios de contraste de instrumentos y medidores, de prueba de materiales) se utilizan grupos convertidores especiales, que

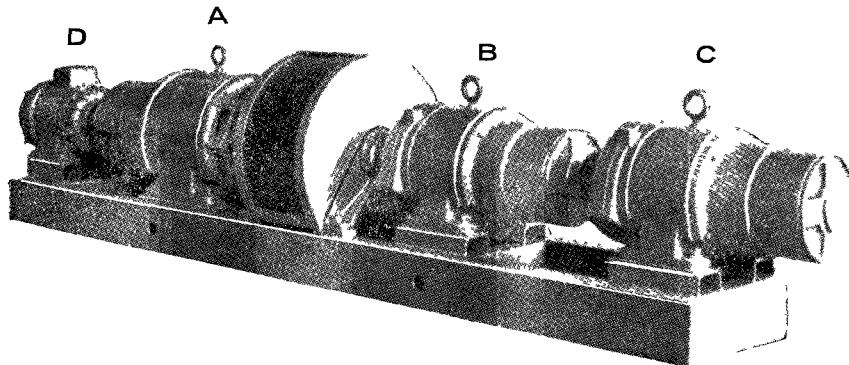


Figura II-3.

se componen de uno o dos alternadores acoplados a un motor de corriente continua o a cualquier otro de velocidad regulable. Disponiendo de esta regulación, se puede obtener la corriente alterna de varias frecuencias industriales, lo que es muy conveniente en ciertos tipos de

mediciones (pérdidas en el hierro, contraste de medidores e instrumentos, etc.). La figura II-3 muestra un equipo de este tipo. Un motor de corriente continua (A) está acoplado axialmente a dos alternadores (B y C). Simultáneamente acciona una excitatriz (D) para ambos alternadores. Uno de los alternadores es de tensión baja (5 a 20 V) y alta intensidad de corriente (100 A); en cambio, el otro puede suministrar la tensión normal de la red (100 a 500 V) y baja intensidad de corriente (5 a 10 A). El alternador de baja tensión se utiliza para la alimentación de los circuitos de intensidad (similar a los acumuladores en circuitos de c.c.) y el otro alimenta circuitos de tensión. A veces, uno de los alternadores está provisto de un mecanismo (servomotor) que permite desplazar axialmente la posición de sus polos con respecto a la posición de los polos del otro alternador. Este sistema presenta la ventaja de permitir por medios mecánicos la obtención de desfases entre los circuitos de tensión y de intensidad —sistema muy empleado en el contraste de medidores de energía, vatímetros, etc.

Regulación de tensión con autotransformador de relación variable

El empleo del autotransformador de relación variable resulta la manera más práctica y precisa de regular la tensión de corriente alterna aplicada en un circuito de medición. Se aclara que el nombre *Variac*, que utilizaremos para designar este aparato, no es más que la marca de fábrica impuesta por The Zenith Electric Co, que los produce. Por extensión, *Variac* ha pasado a ser sinónimo de autotransformador de relación variable.

En principio, el Variac es un autotransformador, en el cual la relación entre la tensión de entrada y la tensión de salida puede hacerse variar a voluntad mediante una escobilla deslizable. Esta escobilla, similar a las que se utilizan en máquinas de colector, se puede hacer deslizar mediante un mecanismo especial, sobre el arrollamiento del autotransformador. Dado que el arrollamiento es de una sola capa, la escobilla va haciendo contacto con cada una de las espiras consecutivas del autotransformador. Existen dos tipos de autotransformadores de relación variable: uno tiene el núcleo de forma toroidal y el otro cuyo núcleo es rectangular. La figura II-4 muestra un variac del tipo más común, o sea, el toroidal. Sobre su núcleo toroidal está bobinado un arrollamiento (1) de una sola capa, sobre el cual existe una zona de contacto eléctrico para la escobilla (2), cuyo deslizamiento se produce accionando el volante (3). El aparato presenta las siguientes ventajas:

1. A diferencia de los controles resistivos no consume energía que se convierte en calor.
2. Debido a que tiene el núcleo calculado en base de muy baja inducción magnética, no produce deformación de la onda.
3. No incide sobre el factor de potencia en el circuito.
4. Es de manejo muy sencillo.

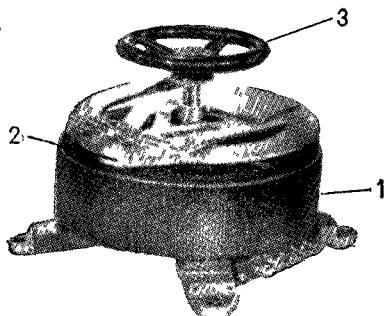


Figura II-4.

Los transformadores de relación variable pueden conectarse de dos maneras: 1. Conectando la red de alimentación a los extremos del arrollamiento del autotransformador (fig. II-5). 2. Conectando la red de alimentación al 90 % de espiras del arrollamiento del autotransformador (fig. II-6). En el primer caso la tensión secundaria, que se utiliza en el circuito de medición, se puede regular desde cero hasta el valor igual a la tensión de la línea.

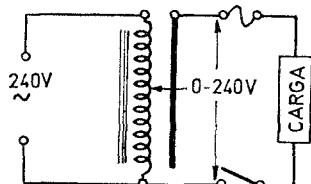


Figura II-5.

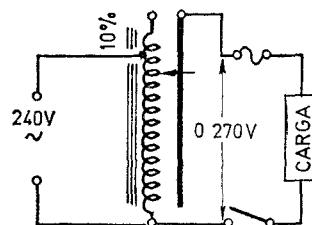


Figura II-6.

En el segundo caso, la tensión obtenida se regula desde cero hasta un valor que supera en un 10 % la tensión de la red. Es decir, que si se trata de la red de 240 V, la tensión máxima que se puede obtener es de 270 V.

El Variac, siendo un transformador, trabaja con corriente alter-

na, pero intercalando un rectificador en el circuito secundario se obtiene la tensión regulable de la corriente continua.

La protección del transformador de relación variable es más compleja que la de un transformador común de relación fija. En un transformador común las máximas corrientes admisibles están determinadas por la relación entre las espiras primarias y las secundarias. Por ejemplo, si el primario tiene 100 espiras y el secundario 20, siendo la máxima intensidad secundaria de 10 A, se deduce que la máxima intensidad primaria será de 2 A. En consecuencia, la sección del alambre del secundario será 5 veces mayor que la del primario. De todo esto se deduce que un fusible secundario de 10 A ofrece la misma protección que un fusible primario de 2 A.

No sucede así con el Variac. Como la escobilla se desliza a lo largo del arrollamiento, tomando contacto con una cantidad variable de espiras, la relación de transformación varía, aunque la sección del alambre sigue siendo la misma. Como es sabido, la intensidad nominal de la corriente está determinada por la sección del alambre. En este caso, el fusible intercalado en la entrada ofrece muy poca protección y, por tanto, la intensidad de corriente secundaria debe ser mantenida dentro de los límites de seguridad. Por esta razón, el auto-transformador de relación variable debe estar siempre protegido por un fusible intercalado en el conductor conectado a la escobilla.

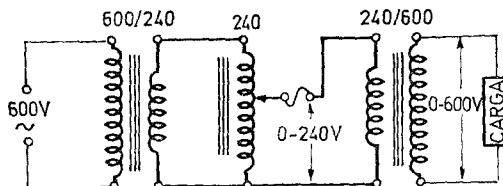


Figura II-7.

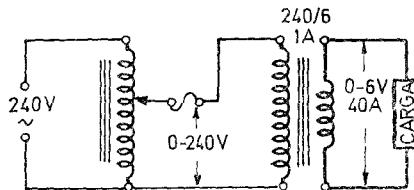


Figura II-8.

Además de las conexiones mostradas en las figuras II-5 y II-6, se pueden utilizar las conexiones que se ven en las figuras II-7 y II-8. El esquema de la figura II-7 muestra la manera de efectuar la regulación

de la tensión alta mediante un Variac de tensión baja, para lo cual se emplean dos transformadores. Uno de los transformadores reduce la tensión alta a la tensión nominal del Variac y el otro, invertido (de amplificación), está conectado a la salida. De esta manera se obtiene la regulación de la tensión alta desde cero hasta su valor máximo.

La figura II-8 muestra el esquema de conexión de un Variac y un transformador reductor. El primario del transformador reductor está conectado a la salida del Variac, obteniéndose así una regulación muy fina en tensiones bajas (en el ejemplo de la figura 0 — 6 V).

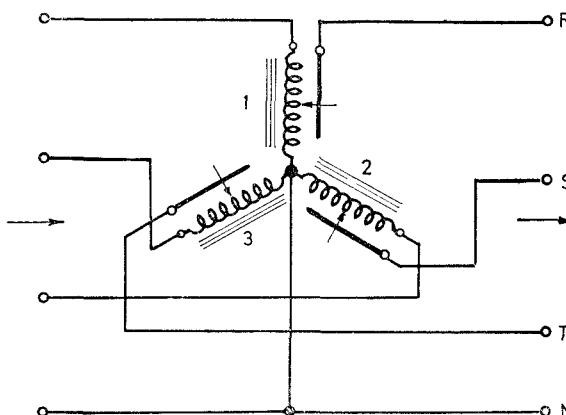


Figura II-9.

La regulación de la tensión en el sistema trifásico se hace utilizando tres transformadores de relación variable conectados a la red trifásica. La figura II-9 muestra el esquema de conexiones a emplear. Se utilizan 3 Variac, los cuales pueden operarse independientemente cada uno, o bien los tres simultáneamente por medio de un único volante que mueve los tres cursores (fig. II-10). Cualquiera de estas dos variantes que se utilice requiere el empleo de la conexión en estrella con neutro para el caso de asimetría de la carga o de la red.

La protección de los transformadores de relación variable utilizados en el sistema trifásico, puede hacerse en forma individual intercalando un fusible o un protector automático (breaker) en la fase de cada Variac. Pero en caso de producirse una sobrecarga o interrupción en una de las fases, en ese instante aparece un peligroso desequilibrio en el circuito, que a su vez origina graves consecuencias en el mismo.

Para evitar estas consecuencias se recomienda el uso de interruptores automáticos tripolares que, desconectan simultáneamente las tres fases.

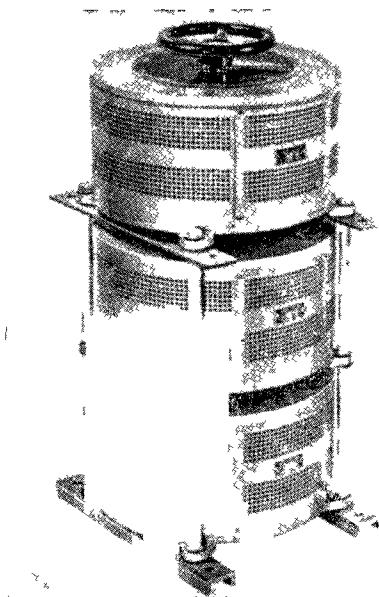


Figura II-10.

Deben tenerse en cuenta las especificaciones generales de los transformadores de relación variable que se dan a continuación.

Intensidad de corriente admisible: Cuando se carga un transformador de relación variable se consideran dos valores de intensidad de corriente; la corriente nominal y la corriente máxima. Ambos valores son calculados en base a 55 °C como límite máximo de calentamiento del devanado.

Se entiende por *corriente nominal* la intensidad de corriente que permite un régimen de trabajo continuo. Esta intensidad nominal se puede tomar en cualquiera de las diferentes posiciones en que está la escobilla sobre el devanado del autotransformador.

Corriente máxima del Variac es la intensidad de corriente que permite trabajo intermitente, dependiendo la duración de estos períodos de trabajo del tanto por ciento de sobrecarga. La figura II-11 muestra la curva de corriente de carga en función del tiempo de su duración. Esta intensidad máxima se puede tomar únicamente en la

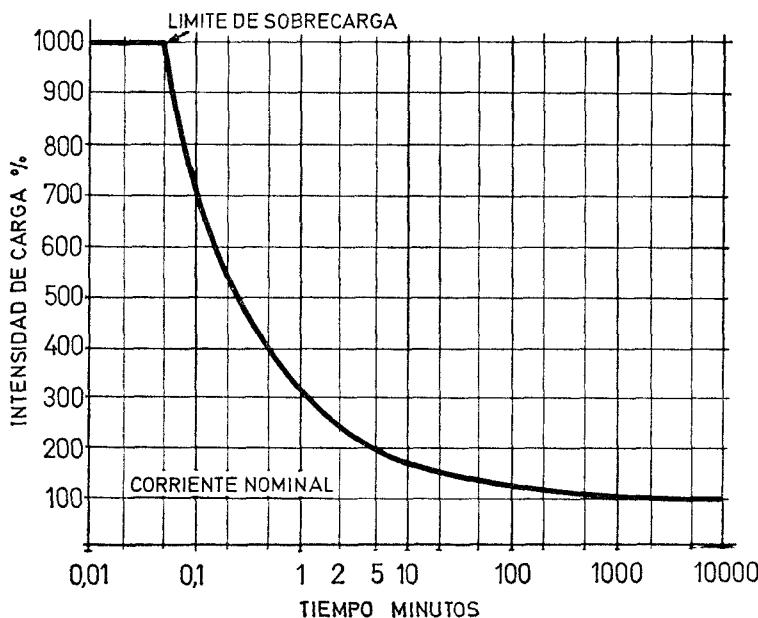


Figura II-11.

posición de la escobilla cerca de los extremos del arrollamiento (principio o final).

Tensión nominal de entrada: Es la tensión de línea aplicada a los bornes de entrada; su valor, determinado por el fabricante, figura en la chapa indicadora. Se puede aplicar una tensión de línea de valor inferior al indicado. En este caso, la potencia que entrega el Variac será inferior a la nominal, puesto que la intensidad de carga no puede ser aumentada.

Algunos modelos de estos aparatos están provistos de un borne adicional conectado a la mitad del arrollamiento. Este borne adicional permite obtener la tensión regulable (de salida) de valor doble que el de la tensión aplicada.

Tensión de salida: Por tensión nominal de salida se considera el valor de la diferencia de potencial medida en el secundario sin carga, cuando en el primario está presente la tensión de entrada de valor nominal. La tensión de salida debe ser regulable para valores que van desde cero hasta cien o ciento diez por ciento, según la conexión que se emplea (figs. II-5 y II-6).

Frecuencia: Por lo general, los transformadores de relación variable se construyen para la frecuencia de trabajo de 50 a 60 Hz. Se les puede utilizar en las frecuencias más bajas, pero con las tensiones de entrada proporcionalmente reducidas. Ejemplo: Un Variac de características de fábrica 240 V, 50 Hz se puede utilizar en 25 Hz, pero con la tensión de entrada de 120 V.

Potencia: Las fábricas indican la potencia aparente del aparato como el producto de intensidad máxima por la tensión nominal de entrada.

Aplicación de resistencias variables en la regulación de la tensión e intensidad

La resistencia variable es un elemento auxiliar indispensable en la tecnología de mediciones eléctricas. Según su empleo y conexión en el circuito se la denomina reostato o potenciómetro. Por lo general, la resistencia variable se utiliza para dos fines: 1. Regulación y limitación de la intensidad de corriente en el circuito de medición. 2. Regulación de la tensión que alimenta una parte o el total del circuito.

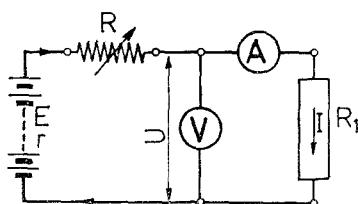


Figura II-12.

1. Si nuestro objetivo es la regulación de la intensidad de corriente en un circuito, conectamos en serie la resistencia variable con la fuente y con el elemento a medir. En este caso, la resistencia variable se denomina reostato. En un circuito en *serie* (fig. II-12), se obtiene

$$I = \frac{E}{r + R + R_1} \quad \text{donde;}$$

E es la fem aplicada al circuito

r es la resistencia interna de la fuente

R es la resistencia variable utilizada como reostato

*R*₁ es la resistencia del elemento en prueba

En esta fórmula se puede omitir, por ser generalmente despreciable, la resistencia interna r de la fuente de alimentación, por lo que

$$I = \frac{E}{R + R_1}; \quad IR + IR_1 = E = U + IR; \quad U = E - IR = E - \frac{E}{R + R_1} \cdot R;$$

$$U = E \left(1 - \frac{R}{R + R_1} \right)$$

Se ve que el reostato produce una caída de tensión en el circuito, que a su vez reduce la intensidad de corriente circulante.

2. En cambio, si el objetivo perseguido es la regulación de la tensión, conectamos la resistencia variable según la figura II-13. Como se ve en la figura, la fuente alimenta toda la resistencia del aparato conectada a los bornes A y B. El circuito de medición en el cual deseamos regular la tensión de alimentación, lo conectamos en *derivación* a dos puntos seleccionados 1 y 2. Entre estos dos puntos está comprendida una fracción α de la resistencia R (αR), sobre la cual se aprecia la caída de tensión $I_o \cdot \alpha R$. Esta caída de tensión actuará como una fuerza electromotriz ficticia E' que alimenta el circuito de medición, produciendo en este circuito la intensidad I (fig. II-14). El valor de esta fuerza electromotriz ficticia se puede determinar por la relación

$$E' = \frac{\alpha \cdot R}{R} \cdot E = \alpha \cdot E$$

que es exactamente la tensión que existe en el circuito abierto ($R_1 = \infty$).

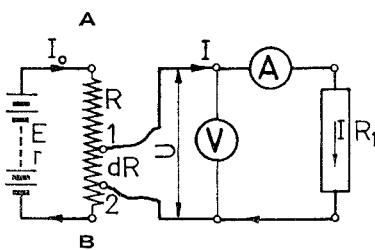


Figura II-13.

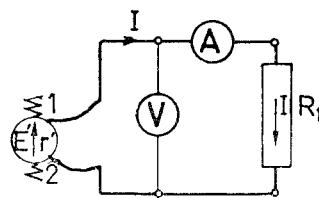


Figura II-14.

La regulación mediante el divisor de tensión permite obtener la tensión de alimentación de valor deseado, comprendido entre cero y la tensión de la fuente E . El inconveniente de este sistema es la continua disipación de energía en la resistencia divisoria R . La cantidad de esta energía podría llegar a ser importante en los casos de pequeños valores de la resistencia R .

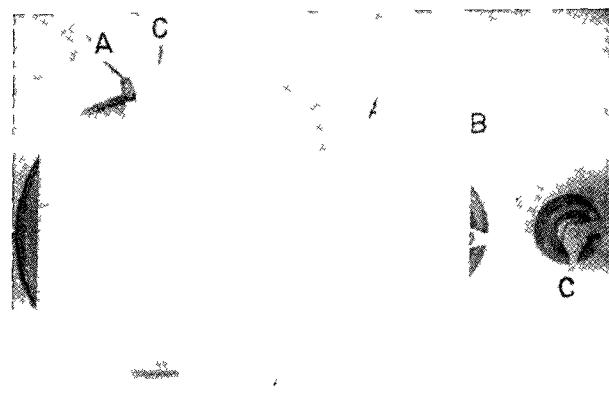


Figura II-15.

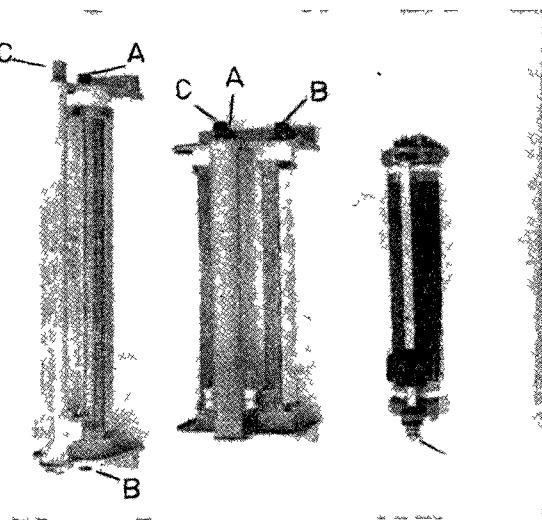


Figura II-16.

CONSTRUCCIÓN Y USO

Por lo general, las resistencias variables se construyen en dos variantes: a) Toroidales (fig. II-15) y b) Rectas (fig. II-16). En ambos tipos, los soportes de material aislante, pueden tener sección circular, rectangular o hexagonal. El alambre de material resistivo (Constantan,

Manganina, Cromoníquel) está bobinado sobre los soportes. Una fina capa de óxido metálico, que se origina por autooxidación, forma el aislamiento entre las espiras. La resistencia variable está provista de tres bornes de conexión; dos (A, B) (figs. II-5 y II-6) unidos con los extremos del alambre resistivo y el tercero C conectado con el cursor. Utilizando solamente dos de los bornes (A y C o B y C) se la puede conectar en el circuito como reostato y empleando los tres bornes A, B y C se la puede emplear en calidad de divisor de tensión (potenciómetro). El recalentamiento de la resistencia origina normalmente su deterioro. Como ya hemos mencionado, el aislamiento entre espiras está formado por una capa de óxido. Cuando se sobrepasa la intensidad de corriente predeterminada por el fabricante, la temperatura del alambre resistivo aumenta considerablemente, originando el desprendimiento de la capa aislante y, en consecuencia, inutilizando el reostato o potenciómetro. Por esta razón se recomienda, al utilizar el cursor, no dejar intercalado en el circuito menos del 15 % del total de la resistencia. Debe tomarse en cuenta esta fracción "muerta" de la resistencia variable en cálculos previos del circuito de medición.

Los fabricantes de las resistencias variables colocan sobre las chapas indicadoras el valor de la resistencia total y el de la carga máxima admisible. Esta carga máxima admisible puede ser expresada en amperios de intensidad máxima o en vatios de potencia máxima disipada.

TABLA II-1

Resistencia (Ω)	4,7	10	39	170	600	1400	4800
Corriente máxima (A)	6,0	4,0	2,0	1,0	0,5	0,35	0,18

En la fotografía de la figura II-15 se puede apreciar la diferencia en tamaño de tres resistencias variables toroidales del mismo valor resistivo, pero de diferente carga admisible. La resistencia "A" es de 1000 W, la "B" es de 300 W y la "C" es de 150 W de potencia admisible disipada. La tabla II-1 indica cómo varía la intensidad máxima admisible para resistencias de diferente valor, construidas para la misma potencia disipada (160 W aproximadamente).

REGULACIÓN EN SERIE

Cuando se desea variar, dentro de ciertos límites, la intensidad de corriente mediante la caída de tensión regulable, se utiliza uno o

varios reostatos. La caída de tensión producida sobre toda la resistencia del resistor variable es igual a la suma de las caídas parciales originadas sobre cada una de las espiras:

$$U_{\text{tot}} = \sum u_{\text{esp}}$$

Cuando el diámetro (D), figura II-17, de la espira (1) es grande y el alambre resistivo es de alta resistividad, las caídas parciales (u_{esp}) son de valor apreciable. En consecuencia, al correr la escobilla (5)

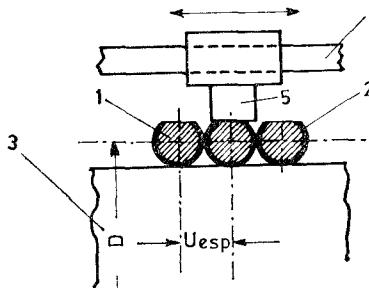


Figura II-17.

- 1 — espira de alambre resistivo
- 2 — capa de óxido aislante
- 3 — soporte refractario
- 4 — riel de cursor
- 5 — escobilla

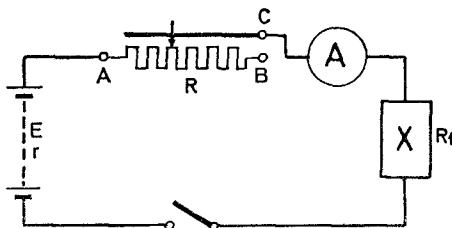


Figura II-18.

sobre el riel (4), pasando de una espira a la otra, la caída de tensión resultante (U_{tot}) varía, no según una línea recta, sino en forma escalonada. Este efecto ocurre cuando se utiliza un solo reostato (fig. II-18), y en este caso no se puede obtener una regulación fina.

Una regulación que es mucho más recomendable y que permite variar la intensidad de corriente en el circuito de manera casi continua, se obtiene utilizando dos o más reostatos conectados entre si en paralelo (fig. II-19). Los resultados óptimos se obtienen seleccionando los reostatos de tal manera que el segundo reóstato es de doble valor resistivo que el primero.

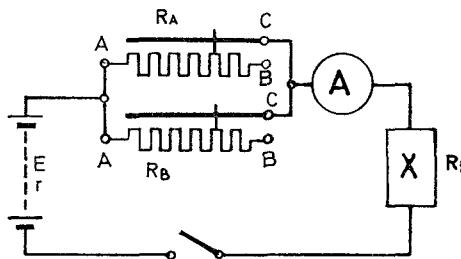


Figura II-19.

Ejemplo: En un circuito dado, compuesto por la fuerza electromotriz E y el receptor X , se requiere una regulación de corriente desde 5 hasta 10 A. La fuente tiene la fem $E = 24$ V, y el receptor X tiene una resistencia fija $R_1 = 2\Omega$. Si no existiera resistencia adicional alguna, circularía la intensidad de corriente $I = \frac{24}{2} = 12$ A. Para regular la corriente, dentro de los límites prefijados, la resistencia total del circuito debe variarse:

$$\text{desde } \frac{24}{5} \text{ V hasta } \frac{24}{10} \text{ V o sea, desde } 4,8 \Omega \text{ hasta } 2,4 \Omega$$

El receptor X tiene la resistencia $R_1 = 2\Omega$. La máxima resistencia requerida por el circuito es de $4,8\Omega$ y este valor lo redondeamos hasta 5Ω . Para la resistencia variable queda la diferencia entre la resistencia del receptor y el total requerido, o sea, $5 - 2 = 3\Omega$. Para obtener en el circuito la circulación de 10 A tendremos:

$$I = \frac{24}{2,4} = \frac{24}{2 + 0,4} = 10 \text{ A}$$

receptor reóstato

En consecuencia, la posición mínima de la escobilla del reostato corresponderá a 0.4Ω :

$$\frac{0,4}{3} \cdot 100 = 13,5\% \text{ (margen de seguridad de trabajo del reostato)}$$

Para obtener la intensidad de 5 A tenemos:

Consideremos ahora el mismo margen de regulación empleando la regulación fina de la corriente en el circuito de medición. Para obtener la regulación fina utilizaremos dos reostatos conectados entre sí en paralelo (fig. II-19). La mejor regulación se obtiene cuando $R_B = 2R_A$. Según las condiciones prefijadas en este ejemplo, la resistencia resultante de ambas resistencias en paralelo debe ser $R = 3 \Omega$. Calculamos las resistencias parciales R_A y R_B :

$$\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{2R_A} = \frac{1}{3} \cdot \frac{2}{3R_A} = 3 ; \quad \frac{9}{2} = R_A = 4,5 \Omega$$

$R_A = 4,5 \Omega \quad R_B = 9 \Omega$

El sistema de regulación mediante dos (o más) reostatos conectados en paralelo es, no sólo sencillo, sino que permite además una regulación sumamente exacta. Con el reostato de menos resistencia se efectúa la primera regulación aproximada y el reostato de resistencia mayor se utiliza para la regulación final, con la cual se alcanza valores exactos.

REGULACIÓN EN PERIVACIÓN

Algunos circuitos requieren que la tensión proveniente de la fuente y aplicada al circuito sea regulable en todo el margen, es decir, desde cero hasta el valor igual al de la tensión de la fuente. Un circuito de verificación de voltímetros es un ejemplo de este tipo de circuitos. Para obtener esta regulación, y especialmente en circuitos de corriente continua, es indispensable utilizar la resistencia variable conectada como un divisor de tensión, a veces denominada, incorrectamente, potenciómetro. Por lo general, en este tipo de circuitos la

potencia requerida es pequeña. Debido a que la corriente de alimentación es derivada de la resistencia divisoria, este tipo de regulación se denomina regulación en derivación. La figura II-20 muestra el circuito de utilización práctica.

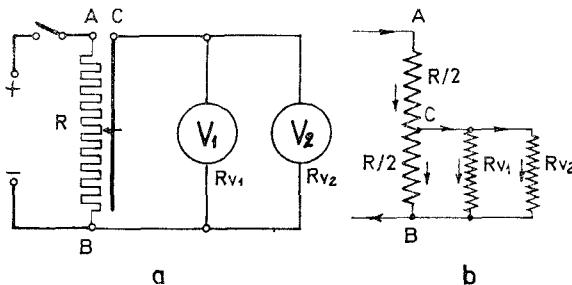


Figura II-20.

La fuente, de tensión constante, se conecta a los extremos de la resistencia variable R , o sea, a los bornes A y B . La corriente de valor $I_o = \frac{E}{R}$ circula en forma continua a través de la resistencia R produciendo una caída de tensión. Conectando el circuito a la resistencia divisoria R , se selecciona la diferencia de potenciales requerida. De este modo se puede obtener cualquier tensión de alimentación de valor comprendido entre cero (cursor en la posición B) y el máximo (cursor en la posición A). En el ejemplo que sigue a continuación se llevará a cabo la selección de una resistencia variable para un divisor de tensión.

Ejemplo: Tensión de la fuente $E = 220$ V. Regulación requerida $0 — 220$ V. Se conectarán dos voltímetros en paralelo (voltímetro patrón y voltímetro en prueba). La resistencia del voltímetro patrón es $R_{V1} = 40.000\ \Omega$ y del voltímetro en prueba $R_{V2} = 10.000\ \Omega$. Como divisor de tensión elegimos una resistencia variable de $500\ \Omega$ y la intensidad de corriente $I_{\max} = 0,5$ A.

Al conectar la fuente a los bornes $A — B$ de la resistencia divisoria circulará la corriente $I_o = \frac{220}{500} = 0,44$ A. Considerando el caso más desfavorable, es decir, los dos voltímetros en paralelo y el cursor en el centro del divisor tendremos que la resistencia resultante de las tres resistencias en paralelo $R/2$, R_{V1} y R_{V2} es:

$$\frac{1}{R_{\text{res}}} = \frac{1}{250} + \frac{1}{40.000} + \frac{1}{10.000} ; \quad R_{\text{res}} = 195 \Omega$$

La resistencia total $R_t = 0,5 R + 195 = 250 + 195 = 445 \Omega$. La intensidad de corriente máxima que circulará en esta posición del cursor es $I_{\text{máx}} = \frac{220}{445} = 0,495 \text{ A} < 0,5 \text{ A}$.

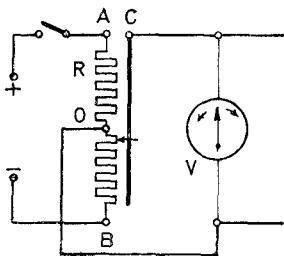


Figura II-21.

A veces es muy conveniente, no solamente variar la tensión del circuito, sino también, al pasar por cero, cambiar el sentido de la corriente. Para este fin se utiliza un divisor de tensión doble. La diferencia entre un divisor de tensión simple y doble consiste en la utilización de un borne adicional 0 (fig. II-21) conectado con el centro de la resistencia R .

Capítulo III

GENERALIDADES SOBRE INSTRUMENTOS DE MEDICION

Los instrumentos de medición eléctrica son instrumentos que acusan con determinada exactitud, por medio de una aguja o índice, o un haz de luz, que se desplazan sobre una escala graduada, el valor de la magnitud eléctrica medida.

Podemos considerar que el instrumento de medición está compuesto de dos sistemas: *a) traductor*, y *b) indicador*. Por lo general, el sistema traductor está compuesto por un circuito eléctrico, en el cual la magnitud medida se convierte en otra que actúa sobre el sistema indicador. Cuando el valor y la naturaleza de la magnitud medida permiten que ésta se aplique directamente al sistema indicador, el sistema traductor es innecesario.

La figura III-1 muestra, esquemáticamente, el funcionamiento de



Figura III-1.

un instrumento de medición eléctrico. La magnitud *X* y su transformada *Y*, es decir, la que actúa sobre el sistema indicador, tienen entre sí una relación de tipo funcional

$$Y = f_1(X)$$

El sistema indicador está compuesto de una parte fija y de una parte móvil, a la cual está fijada la aguja indicadora. El desplazamien-

to de la aguja nos indica el valor de la magnitud medida y depende directamente del valor Y e indirectamente del valor X .

$$\alpha = f_2(Y) = f_2[f_1(X)]$$

La parte móvil del instrumento se desplaza debido a la acción de fuerzas y durante el movimiento se consume energía. Esta energía es proporcionada por el sistema traductor y una parte es transformada en energía mecánica en el sistema indicador. Además, dada la resistencia óhmica que presenta el instrumento, el resto de la energía suministrada por el sistema traductor se convierte en calor debido al efecto Joule.

Sobre la parte móvil actúan dos momentos de fuerza en sentido contrario; el *momento motor* (M_m), cuyo valor depende del valor de la magnitud medida, y el *momento antagonista* (M_a) de valor establecido, que tiende a llevar el elemento a su posición inicial.

El momento antagonista, generalmente producido por una o dos espirales, es proporcional al ángulo de desviación desde la posición inicial del elemento móvil. La posición en la cual se detiene el elemento móvil del instrumento corresponde a un ángulo α , para el cual la suma de los momentos es igual a cero

$$M_m - M_a = 0$$

$$\Sigma M = M_m - (-M_a) = 0 \quad ; \quad M_m = M_a$$

Esto significa que el sistema está en equilibrio. La figura III-2 muestra gráficamente la relación entre ambos momentos. Cuando esto su-

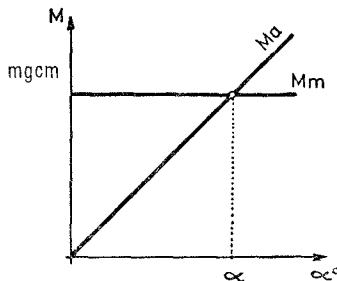


Figura III-2.

cede y siendo $M_m = f_1(X)$ y $M_a = f_2(\alpha)$, se tiene la relación funcional $\alpha = f_3(X)$.

Hasta aquí hemos considerado el caso de un instrumento ideal en el cual existen únicamente dos momentos —momento motor (M_m) y momento antagonista (M_a). En realidad, en cualquier instrumento de medición, además de estos momentos principales, hay que considerar otros adicionales.

Momento de fricción (M_f)

Este momento se origina debido a la fricción en cojinetes y a la existencia en el sistema de cuerpos extraños (polvo, fibras de material aislante, etc.), que frenan el movimiento del elemento móvil. A medida que se va produciendo el desgaste de los cojinetes y que las partículas de polvo se van acumulando en el interior del instrumento, el momento de fricción va en aumento. El momento de fricción (M_f) actúa siempre en sentido contrario al sentido de movimiento del elemento móvil. El gráfico de la figura III-3 ilustra la influencia que ejerce el

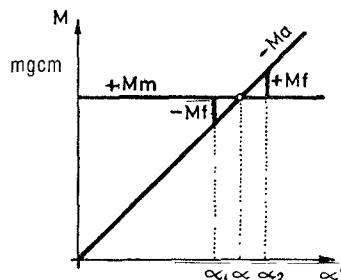


Figura III-3.

momento de fricción sobre el valor de la lectura. Cuando se conecta el instrumento a lo que deseamos medir, la aguja inicia un movimiento ascendente; si se dieran condiciones ideales (que nunca se dan), la aguja se detendría en la posición correspondiente a α , es decir, en el punto en el cual los momentos están en equilibrio ($M_m = M_a$). Sin embargo, debido a la fricción, la aguja se detiene en la posición α_1 correspondiente a un valor inferior que α . Si el valor de la magnitud medida (X) disminuye, la aguja retrocede deteniéndose en la posición α_2 , superior a lo que sería α en este caso.

Momento amortiguador (M_{am})

Hasta aquí se ha tomado en consideración el comportamiento de la parte móvil del sistema indicador del instrumento en las posiciones

correspondientes al equilibrio de momentos, o sea, estabilizados. Ahora vamos a considerar su comportamiento durante el paso de un estado estabilizado a otro. La parte móvil del instrumento no alcanza inmediatamente su estabilidad. Debido a la energía recibida del sistema traductor (circuito eléctrico) y debido a su propia inercia, durante el movimiento producido por el momento motor, la aguja supera la posición correspondiente al equilibrio de momentos y luego debido al momento antagonista se mueve en sentido contrario, pasando otra vez la posición de equilibrio. En consecuencia, se produce un movimiento oscilante de la aguja indicadora, imposibilitando efectuar la lectura. Para acortar o, en algunos casos, anular el tiempo de oscilación se utilizan amortiguadores que frenan el movimiento de la parte móvil, absorbiendo su energía cinética. Cuando la parte móvil se detiene en la posición de equilibrio, el balance energético es el siguiente

$$M_m d\alpha - M_a d\alpha - M_{am} d\alpha - J \frac{d\alpha^2}{dt^2} \cdot d\alpha = 0$$

donde

M_m es el momento motor

M_a es el momento antagonista

M_{am} es el momento amortiguador

$J \frac{d\alpha^2}{dt^2} d\alpha$ es la energía potencial almacenada por la parte móvil

$$M_{am} = C \frac{d\alpha}{dt}$$

C es el coeficiente de amortiguamiento. El momento amortiguador es directamente proporcional a la velocidad del movimiento. Este momento actúa siempre en sentido contrario al movimiento de la parte móvil.

Los movimientos que efectúan las agujas indicadoras de los instrumentos se clasifican en tres tipos según el tipo del amortiguador empleado en la construcción del instrumento:

1. Movimiento periódico amortiguado.
2. Movimiento aperiódico.
3. Movimiento crítico.

En el gráfico de la figura III-4 se puede apreciar claramente la diferencia entre estos tres tipos de movimiento. La figura III-5 muestra el ejemplo del movimiento periódico, en el cual el tiempo empleado en alcanzar la estabilización de la aguja es de 4 segundos. El movimiento aperiódico (2) es un movimiento en el cual se requiere un tiempo

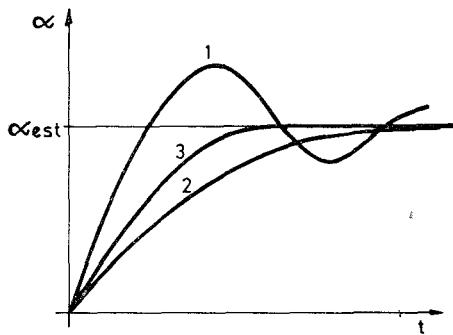


Figura III-4.

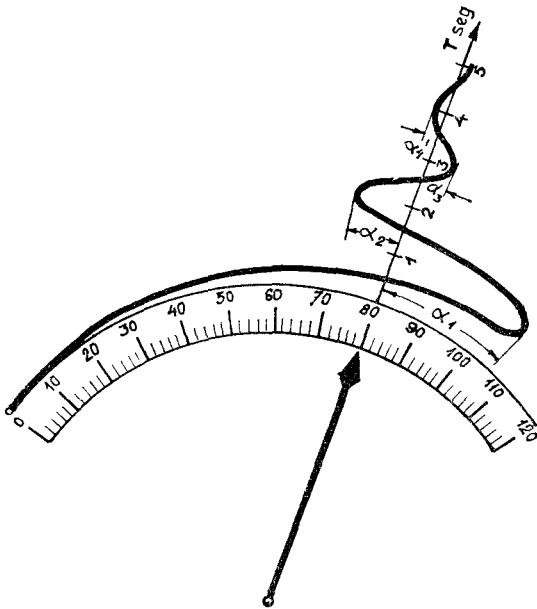


Figura III-5.

relativamente largo para alcanzar la posición estabilizadora (α_{est}); es decir, la aguja se acerca lentamente a la posición correspondiente al equilibrio de momentos. El movimiento denominado “crítico” (3) permite llegar rápidamente la aguja a la posición de lectura.

En los instrumentos comunes (de tablero) se emplean los amortiguadores que permiten el movimiento periódico de rápida amortiguación. Si utilizáramos el movimiento del tipo periódico (o crítico), no podríamos precisar en el acto si la detención de la aguja se debe a algún desperfecto o si el instrumento está trabajando normalmente.

Errores y clases de instrumentos

Todo instrumento de medición tiene cierto error o inexactitud, lo cual se debe en parte a su construcción, en parte al ajuste efectuado durante su contraste y, finalmente, debido al desgaste por uso que el instrumento pueda tener. Consecuencia de ello es que los valores de la magnitud que acusa el instrumento de medición difieren del valor real de la magnitud medida. Las clases de error en base a las cuales se clasifican los instrumentos son las que se detallan a continuación.

ERROR ABSOLUTO

El error absoluto Δ es la diferencia existente entre el valor acusado por el instrumento A_i y el valor real A_r de la magnitud medida:

$$\Delta = A_i - A_r$$

El error absoluto será positivo o negativo según que el valor acusado sea mayor o menor que el valor real de la magnitud.

El error absoluto del instrumento se determina comparando lecturas del instrumento examinado con lecturas del instrumento patrón. Se asume que los valores acusados por el instrumento patrón son reales (sin error).

Ejemplo: Un amperímetro en proceso de verificación acusa 4,5 A y el amperímetro patrón acusa 4,4 A; por tanto, el error absoluto Δ de la lectura es

$$\Delta = 4,5 - 4,4 = + 0,1$$

En la tarjeta de contraste, agregada al instrumento, generalmente figuran los errores calculados durante el contraste. Estos datos sirven para hacer las correcciones pertinentes cuando se efectúan mediciones mediante este instrumento. La corrección tiene el valor igual que el error, pero es de signo contrario

$$A_r = A_i - \Delta, \quad \text{o} \quad A_r = A_i + K$$

$$\text{Corrección } K = -\Delta$$

En nuestro ejemplo el amperímetro acusaba 4,5 A; el valor real de la lectura es:

$$A_r = A_i + K = 4,5 + (-0,1) = 4,4 \text{ A.}$$

ERROR RELATIVO

El error relativo δ del instrumento es la relación entre el error absoluto Δ y el valor máximo de la escala

$$\delta = \frac{\Delta}{A_{\max}} = \frac{A_i - A_r}{A_{\max}}$$

Por lo general, este error se expresa en porcentajes

$$\delta \% = \frac{A_i - A_r}{A_{\max}} \cdot 100 \% \quad (\text{a})$$

Esta fórmula para calcular el error relativo se emplea cuando la escala es uniforme o casi uniforme; también se la utiliza cuando el sector de la escala al que se refiere el error es uniforme o casi uniforme (fig. III-6).

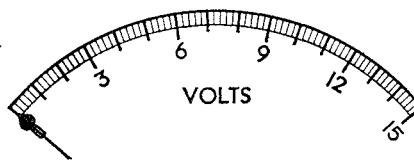


Figura III-6.

Ejemplo: El amperímetro del ejemplo anterior tiene la escala desde 0 hasta 5 A. El error relativo será

$$\delta = \frac{0,1}{5} = 0,02 \quad \text{o} \quad \delta \% = \frac{0,1}{5} \cdot 100 = 2 \%$$

Para los instrumentos que tienen el cero de la escala en el centro (figura II-7), el error relativo se calcula

$$\delta \% = \frac{A_i - A_r}{A_{\max_1} - A_{\max_2}} \cdot 100 \% \quad (\text{b})$$

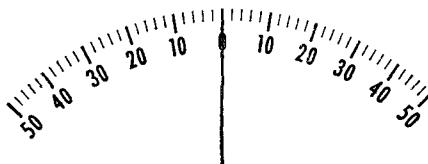


Figura III-7.

Existen instrumentos cuya escala va desde un valor distinto de cero hasta otro valor cualquiera (fig. III-8). Para este tipo de instrumentos el valor relativo se determina mediante la fórmula siguiente:

$$\delta \% = \frac{A_i - A_r}{A_{\max} - A_{\min}} \cdot 100 \% \quad (\text{c})$$



Figura III-8.

Los errores relativos calculados según las fórmulas (a), (b) y (c) se utilizan para agrupar los instrumentos de medición en las denominadas *clases de exactitud*. Se han convenido 7 clases de exactitud que figuran en la tabla III-1.

TABLA III-1

Clase de instrumento	0,1	0,2	0,5	1	1,5	2,5	5
Error relativo δ en condiciones nominales de trabajo	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,5$	± 1	$\pm 1,5$	$\pm 2,5$	± 5

En el cuadrante de todo instrumento estandarizado (fabricado según normas internacionales) debe figurar la cifra que indica su máximo error relativo. Esta cifra, que significa “clase de instrumento”, debe ser una de las que figuran en la tabla III-1.

En algunos casos especiales el error relativo se determina de distinta manera.

a) Cuando la escala del instrumento es muy desigual, por ejemplo, en un ohmímetro (fig. III-9), se emplea la fórmula siguiente:

$$\delta \% = \frac{\alpha_i - \alpha_r}{\alpha_o} \cdot 100 \% \quad (d)$$

donde:

α_i es la parte de la escala recorrida por la aguja medida en mm

α_r es la parte de la escala que corresponde al valor real en mm

α_o es la longitud de la escala en mm

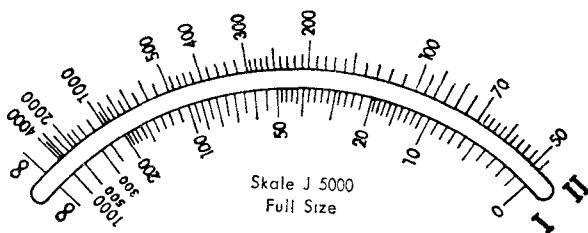


Figura III-9.

b) Cuando la escala del instrumento comprende una pequeña fracción de la magnitud medida, por ejemplo, de un frecuencímetro a lengüetas, se determina el error relativo δ relacionando el error absoluto Δ con el valor acusado por el instrumento y no con el valor máximo de la escala

$$\delta \% = \frac{A_i - A_r}{A_r} \cdot 100 \% \quad (e)$$

El símbolo que indica el error relativo del instrumento debe señalar, en forma convenida, la fórmula según la cual el error fue calculado. Los símbolos convencionales de errores figuran en la tabla III-2.

TABLA III-2

1. Cuando el error relativo está indicado en % de valor máximo de la escala (fórmula a)	2,5
2. Cuando el error relativo está indicado en % de la longitud de la escala (fórmula d)	2,5
3. Cuando el error relativo está indicado en % de valor acusado (fórmula e)	2,5

No siempre toda la escala del instrumento puede utilizarse para efectuar lecturas. Por tanto, se debe distinguir la diferencia que existe entre el alcance de indicaciones del instrumento y el alcance de mediciones. La figura III-10 muestra la diferencia entre ambos conceptos:

El alcance de indicaciones del instrumento, generalmente denominado “alcance del instrumento”, viene determinado por el comienzo y el fin de la escala.

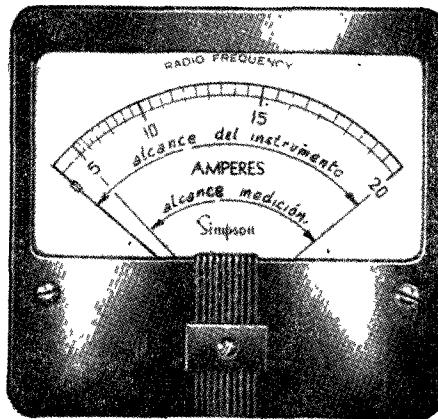


Figura III-10.

El alcance de mediciones del instrumento comprende aquella parte de la escala en la cual se cumplen las condiciones de exactitud del instrumento (clase).

CONDICIONES NORMALES

La clase de exactitud del instrumento, que figura en el cuadrante y, en consecuencia, el error relativo o absoluto del mismo, es válida cuando el instrumento funciona en condiciones normales. Las condiciones de trabajo establecidas por las normas como “normales” son las siguientes:

1. Temperatura de ambiente no superior a los 20 °C. Cuando el instrumento está previsto para funcionar en ambientes de temperaturas diferentes de 20 °C, estas temperaturas deben figurar sobre el cuadrante del instrumento.
2. La frecuencia (en instrumentos de c.a.), con la cual el instru-

mento está contrastado, debe figurar sobre el cuadrante. La falta de inscripción significa que la frecuencia de contraste es de 50 Hz (60 Hz).

3. La forma de la onda (en instrumentos de c.a.) es sinusoidal.
4. La posición del instrumento durante su uso debe ser tal como está señalado en el cuadrante.
5. El instrumento debe trabajar en ausencia de campos magnéticos externos; caso contrario, debe estar provisto de un blindaje magnético cuya existencia está señalada en el cuadrante.

ERRORES ADICIONALES

Cuando el instrumento trabaja en condiciones diferentes a las mencionadas como normales, pueden aparecer errores adicionales que se sumarán a los ya previstos. En consecuencia, el instrumento funcionará fuera de sus márgenes nominales de exactitud. Los errores adicionales pueden dividirse en los siguientes:

1. Error por temperatura. Este error se produce al variar por efectos térmicos las propiedades de los materiales utilizados en la construcción del instrumento. La temperatura del instrumento depende del medio ambiente, del calor disipado internamente por el instrumento y de las condiciones de enfriamiento. El aumento de temperatura en el interior del instrumento produce un cambio en la longitud de espirales antagonistas, en el módulo de elasticidad del material de las mismas e incrementa la resistencia eléctrica de las bobinas. Los imanes permanentes son, asimismo, sensibles a los efectos térmicos.
2. Error por frecuencia. En algunos sistemas el momento motor depende de la frecuencia.
3. Error de forma. Es un error que depende de la deformación de la onda sinusoidal y aparece en aquellos instrumentos en los cuales el momento motor depende del valor medio de la corriente alterna y en los que tienen núcleos ferromagnéticos.
4. Error de posición. Se produce cuando el centro de gravedad de la parte móvil está fuera del eje correspondiente. En este caso la fuerza de gravedad origina momentos adicionales. Este error es de importancia en instrumentos en los cuales el eje es horizontal (instrumentos de tablero).
5. Error por influencia de campos magnéticos externos. Este error depende del campo magnético originado fuera del instrumento, y por tanto de la intensidad de dicho campo, su dirección y su frecuencia. Lógicamente depende también del tipo del sistema medidor.

Sensibilidad y constante

La desviación α de la parte móvil depende del valor de la magnitud medida X y está representada por la función

$$\alpha = f(X)$$

Esta función puede ser lineal o cuadrática (fig. III-11). La relación

$$S = \frac{d\alpha}{dX}$$

se denomina *sensibilidad* del instrumento de medición.

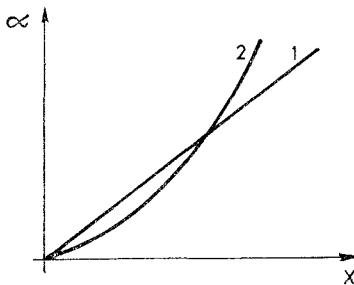


Figura III-11.

Por lo general, los instrumentos tienen la escala graduada en unidades de la magnitud medida. Cada una de las divisiones corresponde a un valor igual de la magnitud medida.

En el caso de la función $\alpha = f(X)$ lineal (1), la sensibilidad es constante. A cada unidad de variación del ángulo de desviación $d\alpha$ de la parte móvil corresponde una unidad de variación dX de la magnitud medida y la escala es *uniforme*.

Cuando la función es cuadrática (2), el valor de la sensibilidad varía a lo largo de la escala; la distancia entre las divisiones de la escala no es igual y la escala no es *uniforme*.

El valor inverso de la sensibilidad se denomina *constante* del instrumento y se expresa

$$\frac{1}{S} = C = \frac{dX}{d\alpha}$$

Por lo general se utiliza la *constante de escala*. Esta constante de escala se calcula

$$C_{\text{esc}} = \frac{\text{alcance del instrumento}}{\text{número de divisiones de escala}}$$

Ejemplo: Un voltímetro tiene 6 alcances o escalas: 0-7,5 V; 0-15 V; 0-30 V; 0-75 V; 0-150 V; 0-300 V. Su escala tiene 150 divisiones. Las constantes de escala para cada uno de los alcances serán:

$$C_{7,5} = \frac{7,5}{150} = 0,05 \text{ V/1}^{\circ}; \quad C_{15} = \frac{15}{150} = 0,1 \text{ V/1}^{\circ}$$

$$C_{30} = \frac{30}{150} = 0,2 \text{ V/1}^{\circ}; \quad C_{75} = \frac{75}{150} = 0,5 \text{ V/1}^{\circ}$$

$$C_{150} = \frac{150}{150} = 1,0 \text{ V/1}^{\circ}; \quad C_{300} = \frac{300}{150} = 2,0 \text{ V/1}^{\circ}$$

Instrumentos de medición. Su clasificación

Los instrumentos de medición se clasifican según dos puntos de vista. Cuando se trata de seleccionar los instrumentos según su precisión, nos guiamos por la clase de exactitud a la cual corresponde. Por otra parte, si seleccionamos el instrumento según el tipo de trabajo que éste va a cumplir, clasificamos los instrumentos en 3 grupos:

1. Instrumentos de laboratorio.
2. Instrumentos portátiles.
3. Instrumentos de tablero.

Relacionando ambas clasificaciones tenemos que, en el grupo de los instrumentos de laboratorio, se incluyen aquellos que debido a su alto grado de precisión están comprendidos entre los instrumentos cuyo error relativo se ubica entre 0 y 0,2 %. Otra característica es que, aunque pueden ser transportados, requieren un trato especial. La fotografía de la figura III-12 ilustra un instrumento de este tipo.

El grupo de instrumentos portátiles comprende aquellos instrumentos que, por el mero hecho de ser portátiles, no pueden ser de gran precisión, hallándose su error relativo entre 0,5 y 2,5 %. Su uso no requiere tanto cuidado como los del grupo anterior. Los resultados obtenidos mediante estos instrumentos (fig. III-13) son de exactitud satisfactoria para las necesidades de procesos tecnológicos de producción.

Finalmente, los instrumentos de tablero son de tipo operacional. Están destinados para montaje fijo en una posición determinada. Para cumplir con su finalidad no necesitan ser de altas clases de exactitud y, por tanto, en su mayoría son de clases comprendidas entre 1,5 y 5 %. La figura III-14 muestra tres tipos de esta categoría de instrumentos.

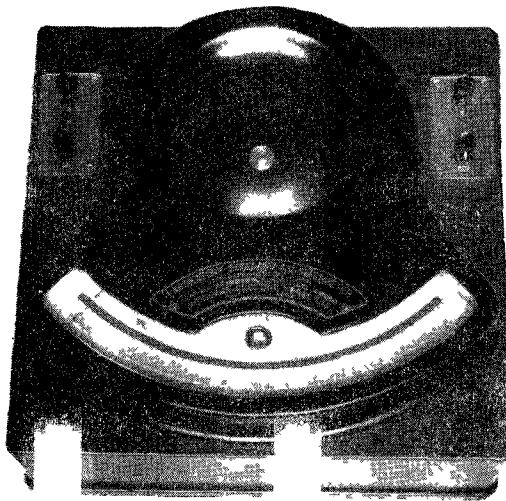


Figura III-12

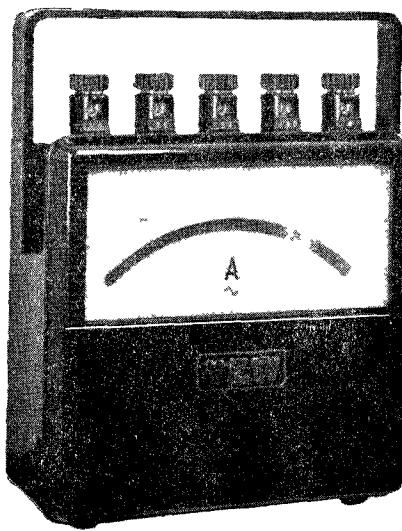


Figura III-13.

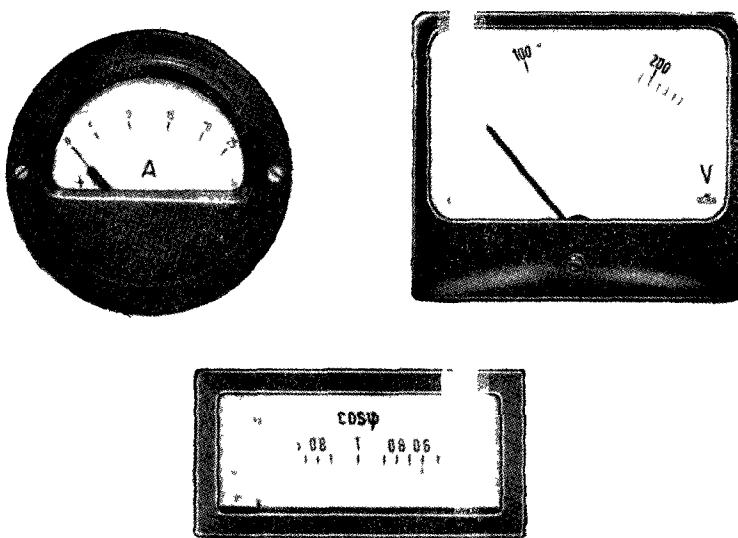


Figura III-14.

La construcción y aplicación de instrumentos se basan en el sistema motor empleado. Existen seis grupos principales que se diferencian por el principio en que se basa su funcionamiento.

INSTRUMENTOS MAGNETO-ELÉCTRICOS

El momento motor se produce debido a la acción mutua entre los campos de un imán permanente y una bobina. Se fabrican de todas clases de exactitud y con las siguientes variantes:

- Magneto-eléctricos de bobina móvil. Este sistema se emplea en amperímetros, voltímetros, ohmímetros de c.c. También se utiliza este sistema en los galvanómetros de todos los tipos.
- Magneto-eléctricos de imán móvil (casi en desuso). Se emplea en amperímetros, voltímetros y galvanómetros de c.c.
- Magneto-eléctricos con rectificador. Son amperímetros, voltímetros de c.a.
- Magneto-eléctricos termoeléctricos (con termoelemento). Se utiliza para amperímetros y voltímetros de c.c. y de c.a.
- Magneto-eléctricos diferenciales (logómetros, de bobinas cruzadas). Se emplean en construcción de megohmímetros, cofímetros y frecuencímetros.

INSTRUMENTOS ELECTROMAGNÉTICOS

El momento motor se produce debido a la acción mutua entre el campo de una bobina fija y un núcleo móvil. El sistema se utiliza en la construcción de instrumentos de bajas clases de exactitud, o sea, 1; 1,5; 2,5 y 5 %.

- a. Electromagnéticos mono y multinúcleos. Por lo general, se emplean en amperímetros, voltímetros de c.c. y c.a. portátiles y de tablero.
- b. Electromagnéticos diferenciales (logómetros). Se utilizan en cofimetros, frecuencímetros y sincronoscopios.
- c. Electromagnéticos de vibración: frecuencímetros a lengüetas.

INSTRUMENTOS ELECTRODINÁMICOS

El momento motor es producido en base a la acción mutua entre bobina móvil y bobina fija. Altas clases de exactitud para c.a. (0,2; 0,5 y 1,0).

- a. Electrodinámicos sin hierro. Se utiliza en amperímetros, voltímetros y vatímetros de c.c. y c.a.
- b. Ferrodinámicos. Son amperímetros, voltímetros y vatímetros de c.c. y c.a.
- c. Diferenciales (logómetros). Se emplean en cofimetros, frecuencímetros.

INSTRUMENTOS DE INDUCCIÓN

El momento motor se produce debido a la generación de corrientes Foucault. Se fabrican en bajas clases de exactitud, por lo general instrumentos de tablero (2,5 y 5 %).

- a. De inducción simples. Se emplean para amperímetros, voltímetros y como más importante en *medidores de energía*. Para corriente alterna únicamente.
- b. De inducción diferenciales. Frecuencímetros.

INSTRUMENTOS ELECTROSTÁTICOS

El momento motor es producido por cargas estáticas. Se utilizan como voltímetros de c.c. y de c.a. únicamente. Bajas clases de exactitud.

INSTRUMENTOS ELECTROTÉRMICOS

El momento motor se produce debido a la dilatación de un elemento metálico originada por el calor debido al efecto de Joule. Se utiliza en instrumentos de bajas clases de exactitud.

- Electrotérmicos de hilo caliente (en desuso). Amperímetros y voltímetros.
- Bimetálicos. Son amperímetros y voltímetros. Además se utilizan en todo tipo de indicadores en el ramo automotriz.

Dispositivos indicadores

El dispositivo indicador de un instrumento de medición consiste en una aguja indicadora que se desplaza sobre una escala graduada. El desplazamiento de la aguja es producido por el momento motor del instrumento. En algunos instrumentos de gran precisión (algunos instrumentos de clase 0,1 y 0,2 y galvanómetros), en lugar de la aguja habrá un haz de luz que se refleja en un espejo fijado en la parte móvil del instrumento. Según: *a)* el tipo de instrumento (de laboratorio, portátil, de tablero); *b)* clase de exactitud del mismo, y *c)* su sistema motor, el instrumento estará provisto de determinado tipo de escala e indicador. La escala puede ser de graduación fina (figura III-18), uniforme o desigual.

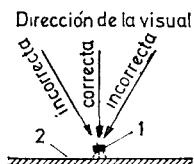


Figura III-15.

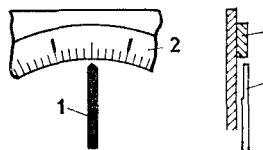


Figura III-16.

El dispositivo indicador (escala con aguja) debe permitir la obtención de lecturas con un mínimo de error. El error de lectura más común es el *error de paralelo*. Este error se debe a que la aguja se encuentra a cierta distancia de la escala y, por tanto, la exactitud de la lectura depende del ángulo con el cual el observador mira a la aguja del instrumento (fig. III-15). Los instrumentos de precisión tienen el dispositivo indicador de construcción especial con dos variantes: *a)* la aguja se mueve en el mismo plano que la escala, figura III-16,

y b) la escala está provista de un espejo (3) colocado a lo largo de la escala (figs. III-17 y III-18). Al efectuar la lectura se mira a la aguja de manera que la imagen de la aguja esté cubierta por la aguja misma.

A continuación se adjunta facsímiles de distintos tipos de esca-

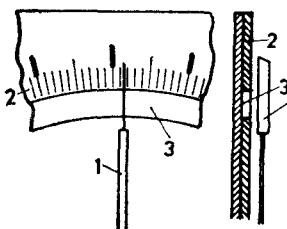


Figura III-17.

Escala con graduación gruesa



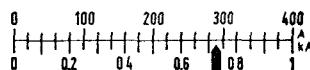
Escala con graduación gruesa-fina



Escala de numeración doble



Escala de graduación doble



Escala con graduación fina



Escala con graduación fina y espejo



Figura III-18.

Escalas de instrumentos de tablero

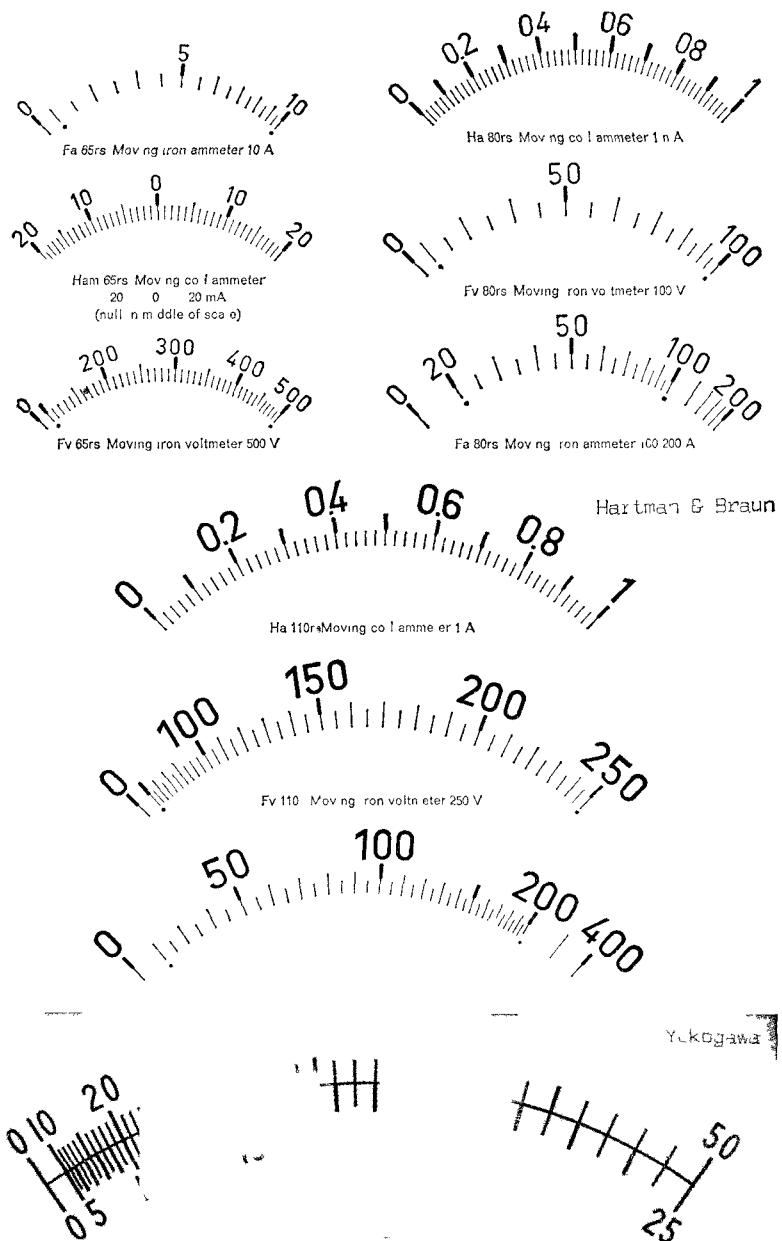


Figura III-19

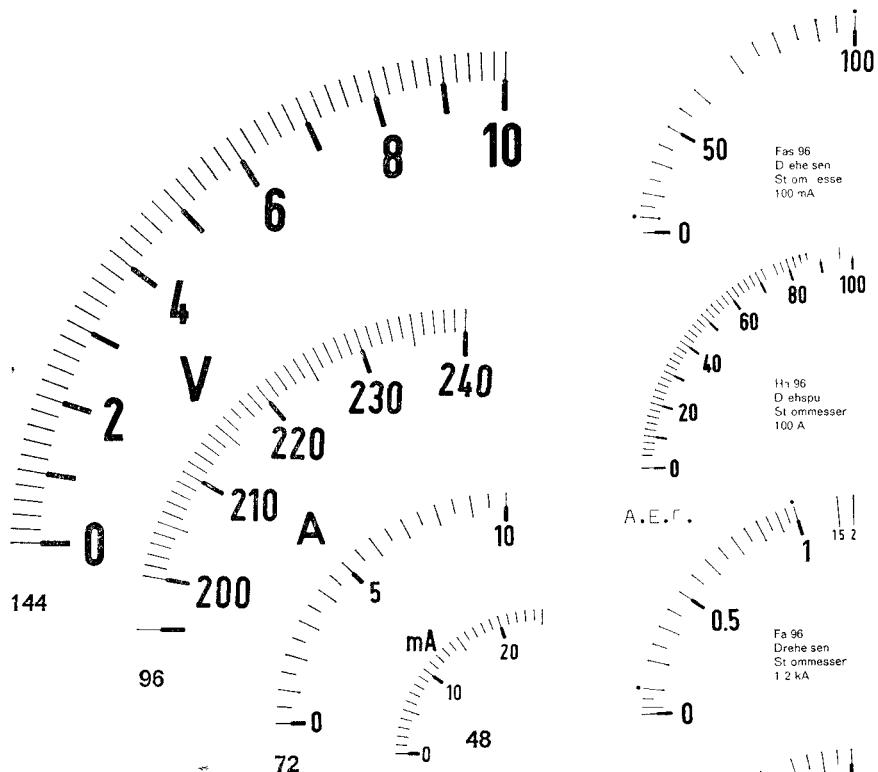


Figura III-20.

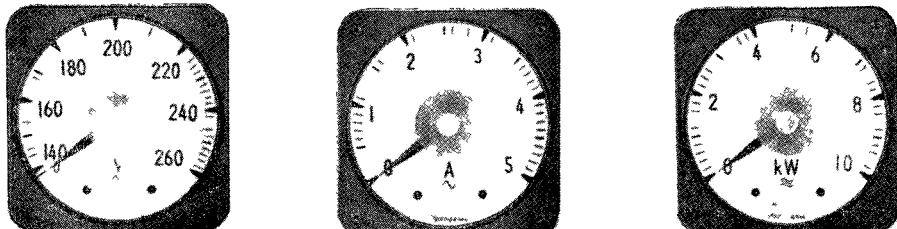


Figura III-21.

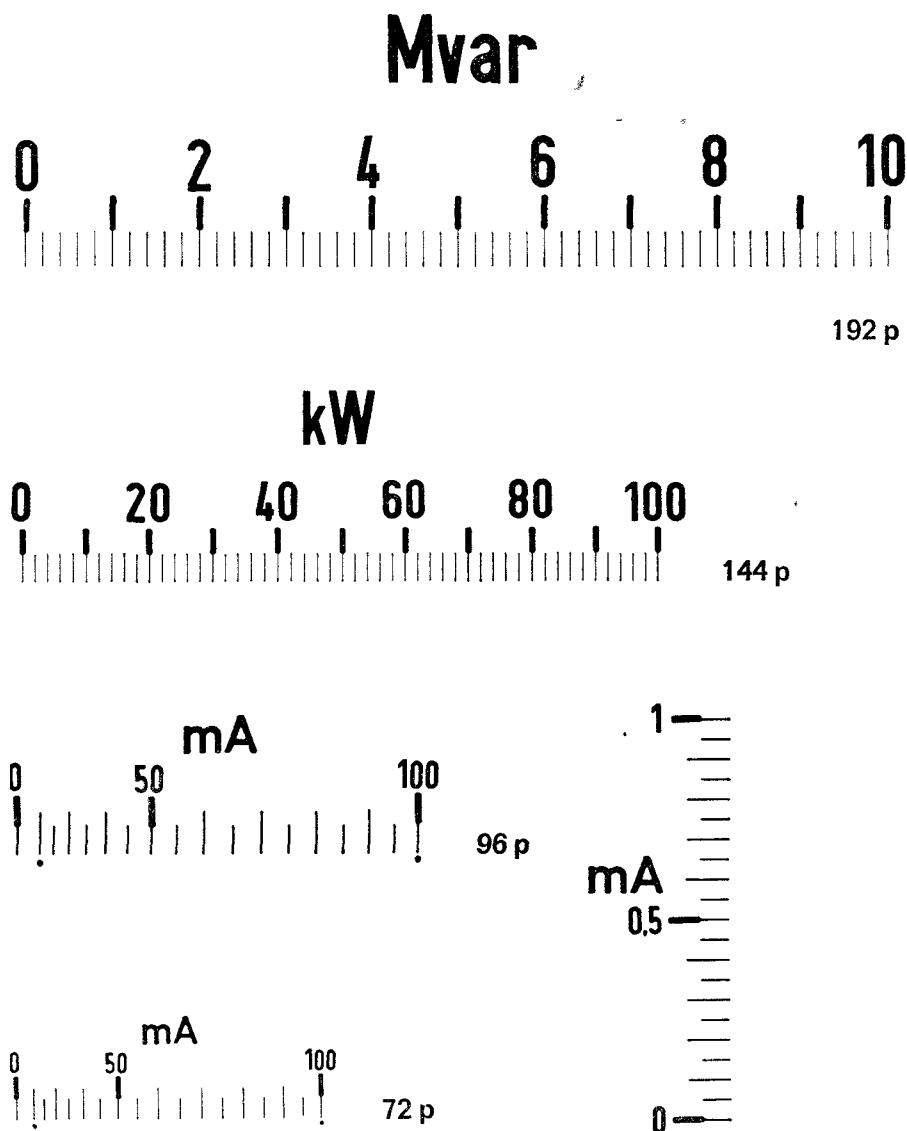


Figura III-22.

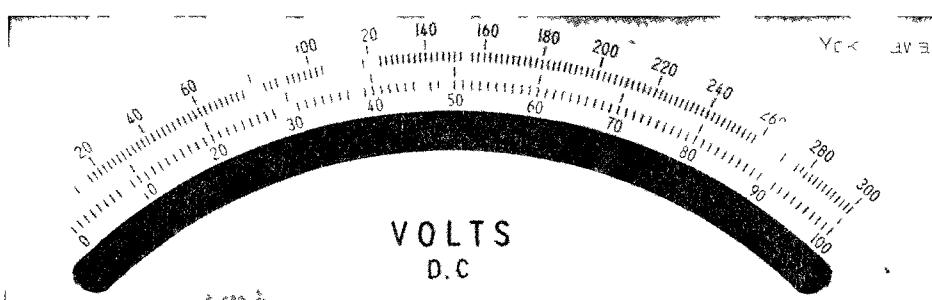
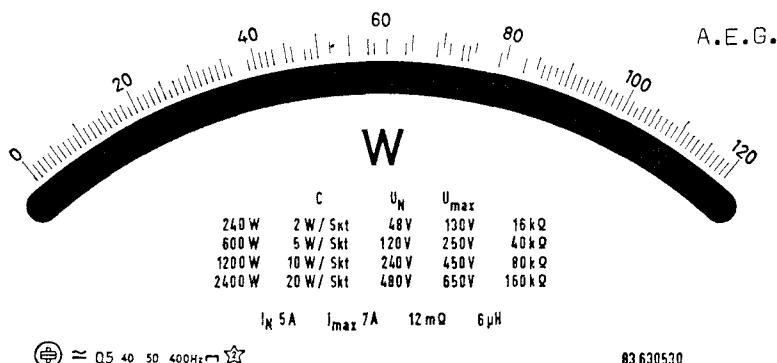
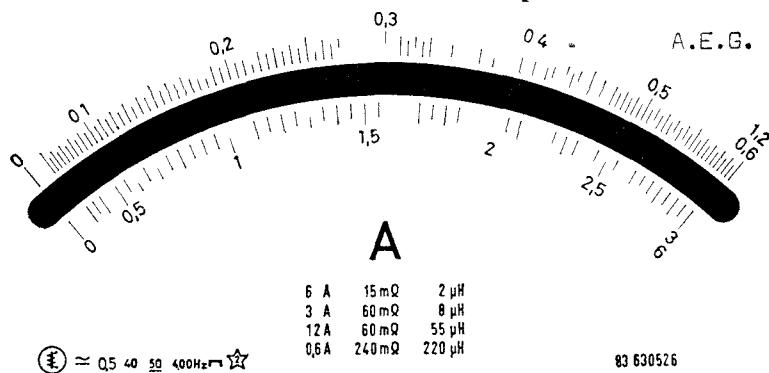
Escalas de instrumentos portátiles

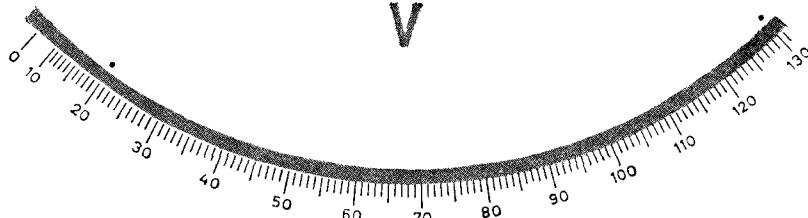
Figura III-23.

Escalas de instrumentos de laboratorio

④ 15 90 500Hz

N
NORMA

1701 00221/1733415



65V 1625Ω

130V 6500Ω

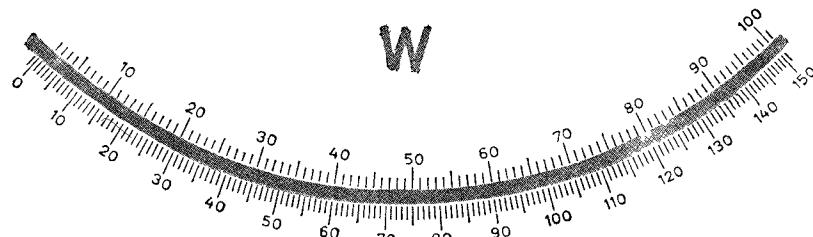
260V 13000Ω

520V 26000Ω 650V 32500Ω

⊕ 15 90 500Hz

N
NORMA

1701 10122/2040049



5A 35mΩ
35 μH

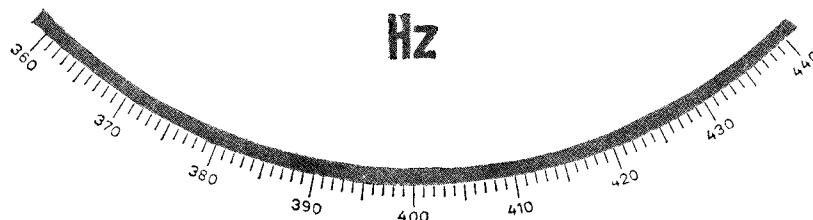
2.5A 0.13 Ω
0.14mH

Spannungspfad
15 mA

□ ~ 0 □

N
NORMA

1701 01402/1710632



Eigenverbrauch
ca 1VA

Figura III-24.

las. Los mismos fueron tomados de catálogos de varias firmas fabricantes de instrumentos.

En instrumentos de tablero se suelen utilizar escalas tales como las de las figuras III-19, III-20, III-21 y III-22. En los instrumentos redondos se emplea preferentemente las escalas del tipo de la figura III-19 y en instrumentos cuadrados las de la figura III-20. Las escalas circulares de la figura III-21 y las rectangulares de la figura III-22, se suelen emplear en los instrumentos del tipo operacional.

Las escalas de la figura III-23 corresponden a instrumentos portátiles. Como se puede apreciar, estas escalas están provistas de un espejo antiparalelo, ya descrito anteriormente. La figura III-17 ilustra la manera de usarlo.

La figura III-24 muestra facsímiles de escalas de instrumentos de precisión (de laboratorio) de clases comprendidas entre 0,1 y 0,2.

La figura III-25 muestra parte de una escala de un instrumento patrón fabricado por Goertz (Austria). La escala de 150 divisiones tiene 300 mm de longitud. Una lente amplificadora sobre un trípole permite efectuar lecturas hasta 0,05 de una división lo que corresponde a 0,033 % del total de la escala.

Existe una gran variedad de formas de las agujas indicadoras. La figura III-26 muestra seis distintos tipos de agujas. Los tipos a, b, c,

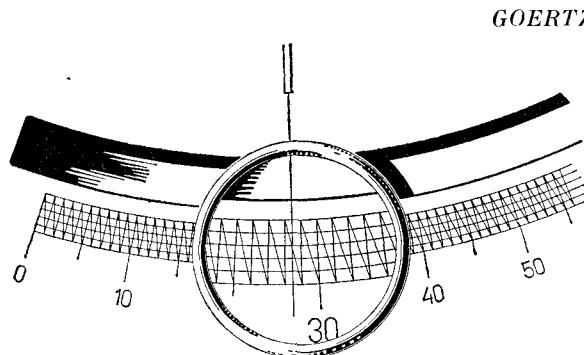


Figura III-25.

d y e tienen la punta bien visible incluso desde una distancia considerable y se los emplea en instrumentos de tablero. Por cierta tradición, las agujas con punta de lanza se utilizan en instrumentos circulares y, las que tienen forma de barra, en rectangulares y cuadrados. Las agujas similares a la de la figura III-26 f, se utilizan en instrumentos portátiles y de laboratorio.

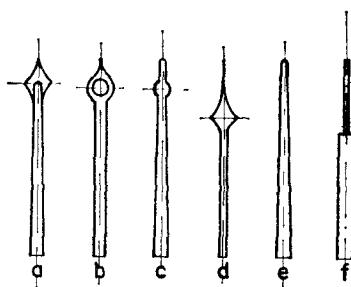


Figura III-26.

En algunos instrumentos de precisión se emplea el indicador luminoso en lugar de la aguja material. Este indicador luminoso consiste en un haz de luz, producido por el filamento de una pequeña lámpara incandescente; este haz de luz, reflejándose en un espejo fijado a la parte móvil del instrumento, proyecta sobre la escala graduada y transparente una mancha circular o rectangular. Este sistema tiene varias características que aumentan la sensibilidad del instrumento. Son las siguientes:

1. El ángulo de reflexión es el doble del ángulo de desviación de la parte móvil (fig. III-27).
2. La longitud "activa" del haz de luz es mayor que la de una aguja indicadora.

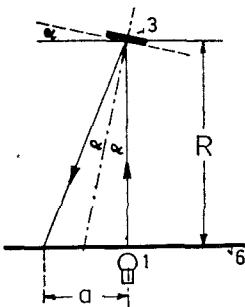


Figura III-27.

3. El peso de la parte móvil del instrumento y, en consecuencia, su momento de inercia, es pequeño en comparación con los de los instrumentos de aguja.
4. Descarta toda posibilidad de error de paralaje.

Como se puede apreciar en la figura, la desviación a de la mancha luminosa sobre la escala, depende de la distancia R de la escala (6) al espejo (3). Para evitar la necesidad de construir las cajas de instrumentos demasiado largas se utiliza un sistema óptico complejo. Este sistema consiste en un conjunto de espejos planos y cilíndricos donde el haz de luz, después de reflejarse sucesivamente en los espejos, se proyecta finalmente en la escala. La figura III-28 muestra el sistema óptico adoptado por la firma Norma y la figura III-29 pro-

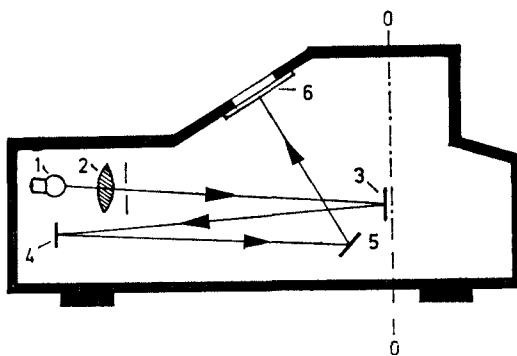


Figura III-28.

- 1 — lámpara
- 2 — condensador óptico
- 3 — espejo sobre la parte móvil
- 4 — espejo cilíndrico
- 5 — espejo plano
- 6 — escala transparente

porciona la vista general de un amperímetro de este tipo de clase 0,1. En la figura III-30 se ve el facsímil de escala de un instrumento de este tipo.

CORRECTOR DE CERO

En estado de reposo (sin conectar), la aguja del instrumento debe estar en el cero de la escala. Solamente en el caso de instrumentos que carecen del sistema antagonista (instrumentos diferenciales) no existe esta exigencia. A veces, debido a algún defecto, la aguja sufre una pequeña desviación y no acusa exactamente el cero de la escala. Esto causaría un error que se denomina "error inicial" del instrumento. Para corregir este error los instrumentos están provistos de un "corrector de cero". La figura III-31 muestra el funcionamiento de

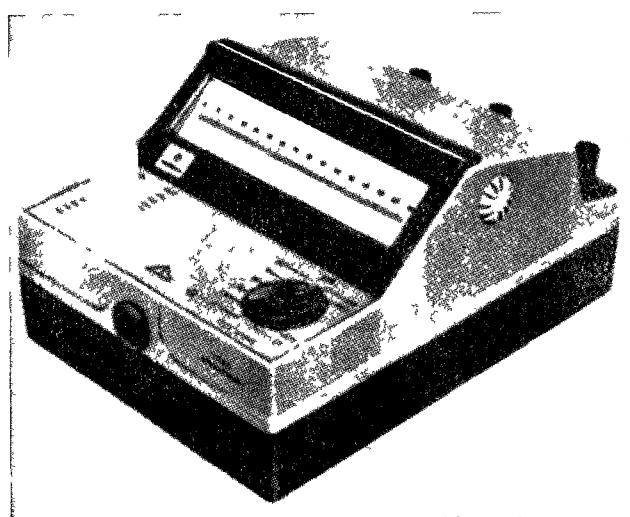


Figura III-29.



Figura III-30.

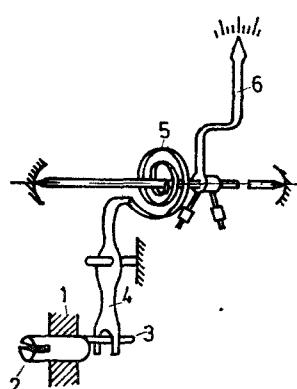


Figura III-31.

este dispositivo. En el vidrio frontal del instrumento (1) está colocado un tornillo (2) que en su extremo interior tiene fijado en forma excentrica un perno (3) que está acoplado a la horquilla (4). El brazo de la palanca de la horquilla está unido al extremo de la espiral antagonista (5). Girando el tornillo (2) mediante un destornillador, se produce un desplazamiento de la aguja que permite colocarla exactamente sobre el cero de la escala. Según las normas, el desplazamiento de la aguja, mediante este dispositivo, no debe exceder el 12 % de la longitud de la escala.

Símbolos e indicaciones sobre cuadrantes

El usuario debe tener la posibilidad de orientarse en las características del instrumento que utiliza, sin consultar el folleto descriptivo. Para facilitar esta orientación, todos los instrumentos fabricados según las normas internacionales, llevan sobre sus cuadrantes los símbolos convenientes que proporcionan informaciones útiles para su uso. Estos símbolos se dividen en:

A. SÍMBOLOS DE INFORMACIÓN GENERAL

- Marca de la fábrica.
- Número de fabricación.
- Año de fabricación.
- Unidad de medición.

B. SÍMBOLOS CORRESPONDIENTES AL USO

- Sistema motor (tabla III-3).
- Sistema de corriente (tabla III-4).
- Clase de exactitud (tabla III-2, ver errores).
- Posición de trabajo (tabla III-5).
- Tensión de prueba de aislamiento (tabla III-6).
- Observaciones especiales (tabla III-7).

Los símbolos de información general a, b y c, pueden figurar en cualquier parte del cuadrante y d (unidad) está ubicada por encima o por debajo de la escala. Los símbolos del uso se suele imprimir en uno de los rincones del cuadrante. La figura III-32 muestra un ejemplo de

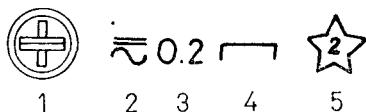


Figura III-32.

TABLA III-3

Símbolos del sistema motor

1.a.	Magnetoeléctrico de bobina móvil	
1.b.	Magnetoeléctrico de imán móvil	
1.c.	Magnetoeléctrico con rectificador	
1.d.	Magnetoelectrico con termoelemento	
1.e.	Magnetoeléctrico diferencial	
2.a.	Electromagnético	
2.b.	Electromagnético diferencial	
2.c.	Electromagnético de vibración	

3.a.	Electrodinámico sin hierro	
3.b.	Ferrodinámico	
3.c.	Ferrodinámico diferencial	
4.a.	De inducción	
4.b.	De inducción diferencial	
5.	Electrostático	
6.a.	Electrotérmico de hilo caliente	
6.b.	Electrotérmico bimetálico	

TABLA III-4
Símbolos del sistema de corriente

1.	Instrumento de corriente continua	
2.	Instrumento de corriente alterna	
3.	Instrumento de corriente continua y alterna	
4.	Instrumento de corriente trifásica de un sistema	
5.	Instrumento de corriente trifásica de dos sistemas	
6.	Instrumento de corriente trifásica de tres sistemas	

TABLA III-5
Símbolos de posición de trabajo

1.	Posición obligatoria <i>horizontal</i>	
2.	Posición obligatoria <i>vertical</i>	
3.	Posición inclinada (ejemplo 60°)	

TABLA III-6

Símbolos de tensión de prueba de aislamiento

1.	Instrumento con el aislamiento probado con 2 kV.	
2.	Instrumento con el aislamiento probado con 500 V.	
3.	Instrumento no sometido a prueba de aislamiento	

TABLA III-7

Símbolos especiales (ejemplos)

1.	Atención: No tocar durante el trabajo; puede resultar peligroso	
2.	Atención: No utilizar antes de consultar instrucciones especiales adjuntas	
3.	Blindaje magnético	
4.	Blindaje electrostático	

un conjunto de estos símbolos. Otros ejemplos se pueden apreciar sobre los facsímiles de las escalas (figs. III-23, III-24).

Dispositivos antagonistas

En instrumentos en los cuales la parte móvil gira sobre pivotes, el momento antagonista (M_a) es proporcionado por una o dos espirales. Estas espirales se confeccionan de bronce fosforoso u otra aleación de características similares. En instrumentos magnetoeléctricos y electrodinámicos las espirales tienen doble función; además de proporcionar el momento antagonista sirven para conducir la corriente eléctrica a la bobina (o bobinas) móvil y, por tanto, la resistencia eléctrica de la espiral tiene gran importancia.

El momento antagonista que actúa sobre la espiral se puede expresar mediante la ecuación

$$M_a = m \cdot \alpha$$

donde

m es la constante de elasticidad de la espiral y
 α es el ángulo máximo de torsión de la espiral.

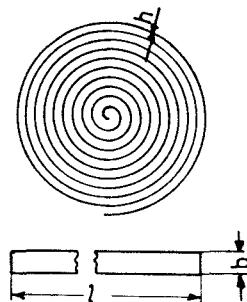


Figura III-33.

La constante m se calcula empleando la fórmula de Resistencia de Materiales:

$$m = E \cdot \frac{b \cdot h^3}{12 l} (\text{mgcm}/90^\circ)$$

donde

E es el módulo de elasticidad del material de la espiral; l , b , h , son el largo, el ancho y el espesor respectivamente (fig. III-33).

En los instrumentos de tablero (clases 1,5 a 5) se utilizan espirales que proporcionan momentos antagonistas de valores compren-

didos entre 5 y 500 mgcm/90°. El valor de la resistencia eléctrica de las espirales antagonistas que se utilizan en la construcción de instrumentos magnetoeléctricos y electrodinámicos, oscila entre 0,2 y 15 Ω.

La temperatura tiene influencia sobre el módulo de elasticidad E y sobre las dimensiones b , h , l de la espiral. El aumento de la temperatura proviene de dos fuentes: 1) del instrumento mismo (efecto Joule) y 2) del ambiente. Al variar la temperatura del resorte, varía su constante y , en consecuencia, varía el momento antagonista M_a . Este efecto origina un error adicional. En una espiral de bronce fosforoso, la constante disminuye en 0,4 % cuando su temperatura aumenta en 10 °C. Para compensar este error el momento motor del instrumento debe disminuir en la misma proporción.

En instrumentos en los cuales la parte móvil está suspendida mediante una cinta elástica, el momento antagonista está proporcionado por la misma cinta. La figura III-34 muestra el principio de la cons-

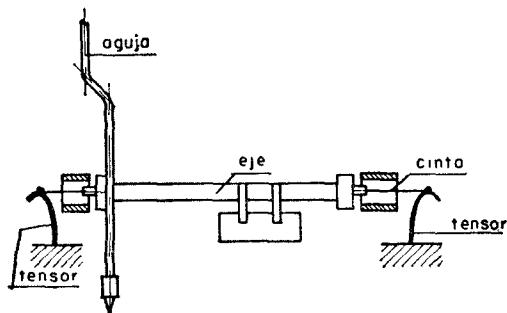


Figura III-34.

trucción. Por lo general, la cinta de suspensión es de sección rectangular ($b \times h$) y el momento antagonista es función de sus dimensiones, de las propiedades del material y del ángulo de torsión. El momento antagonista (M_a) se expresa como en el caso de espirales

$$M_a = m' \cdot \alpha$$

donde

m' es la constante de la cinta de suspensión y α es el ángulo de torsión.

La constante m' se calcula mediante la fórmula

$$m' = G \cdot \frac{b \cdot h^3}{3 l} (\text{mgcm}/90^\circ)$$

donde

G es la constante de torsión del material ($G = 0,65 E$ aproxima-

damente); b , h y l son el ancho, el espesor y el largo de la cinta, respectivamente.

Al comparar la constante m de espirales con la m' de cintas se puede observar que el momento antagonista proporcionado por las cintas de suspensión tiene valores pequeños. Estos valores están comprendidos entre 0,01 y 2,0 mgcm/90°. En consecuencia, el momento motor requerido en instrumentos con suspensión a cinta es de pequeño valor y, por tanto, este sistema se presta para los instrumentos de precisión (clases 0,1 - 0,2).

Dispositivos amortiguadores

Los amortiguadores son los dispositivos que mediante su eficacia determinan el tipo del movimiento de la parte móvil del instrumento y, en consecuencia, de la aguja indicadora. Estos dispositivos proporcionan el momento amortiguador M_{am} , cuya magnitud es, por lo general, proporcional a la velocidad angular de la parte móvil del instrumento

$$M_{am} = C \cdot \frac{da}{dt} \quad (C = \text{constante})$$

Para obtener este momento amortiguador se emplean los amortiguadores neumáticos y electromagnéticos. Estos últimos se utilizan en instrumentos en los cuales la existencia de un fuerte campo magnético constante dentro del instrumento, no influye en su propio momento motor.

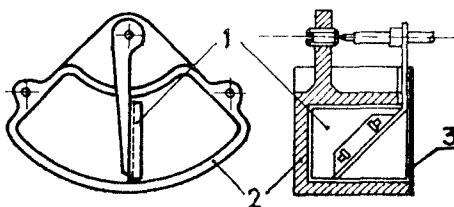


Figura III-35.

1, aleta; 2, cámara; 3, tapa

El amortiguador neumático (de aire) figura III-35, consiste en la aleta (1), fijada al eje de la parte móvil, que se mueve dentro de la cámara de compresión (2). Durante el movimiento de la parte móvil,

junto con la aleta y la aguja, el aire comprimido por la aleta pasa de una parte de la cámara a la otra a través del espacio entre los bordes de la aleta y las paredes de la cámara. Una parte de la energía cinética de la parte móvil se transforma en calor. La eficacia del dispositivo depende de la distancia entre los bordes de la aleta y las paredes de la cámara. En consecuencia, de esta distancia dependerá el tipo del movimiento de la parte móvil y de la aguja indicadora. En los instrumentos de movimientos aperiódico o crítico esta luz suele ser de valor entre 0,3 y 0,4 mm. Las aletas son láminas de duraluminio de 0,1 a 0,15 mm de espesor.

Los amortiguadores electromagnéticos (fig. III-36), trabajan en función de las corrientes inducidas en un elemento metálico debido a su

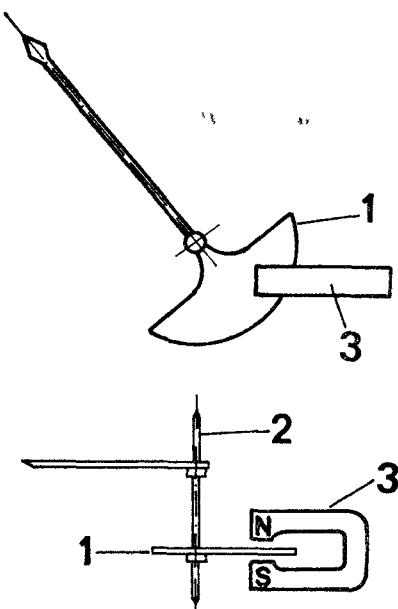


Figura III-36.

movimiento en el campo de un imán permanente. Un segmento de lámina de aluminio (1) está fijado en un extremo al eje (2) de la parte móvil y su otro extremo se encuentra en el campo magnético del imán permanente (3). Durante el movimiento de la parte móvil, el segmento corta las líneas de fuerza del flujo magnético ϕ proporcionado por el imán. En consecuencia, en el segmento se generan las corrientes in-

ducidas. Debido a la circulación de estas corrientes se gasta la energía sobrante de la parte móvil. La intensidad de estas corrientes inducidas es proporcional a la velocidad del movimiento del segmento y a la conductancia del material del mismo. La fem inducida en el segmento debida a su movimiento es

$$e = c_1 \cdot \phi \cdot v$$

donde ϕ es el flujo magnético total del imán cortado por el segmento; v es la velocidad angular del segmento entre los polos del imán.

La intensidad de corriente que circula en el segmento es proporcional a la conductancia específica del material del segmento y a la fem inducida:

$$i = G \cdot e = c_2 \cdot G \cdot \phi \cdot v = c_2 \cdot \gamma \cdot \phi \cdot v$$

La fuerza de frenado es proporcional a la inducción magnética B y a la intensidad de corriente ($B = \frac{\phi}{s}$).

$F = c_3 \cdot B \cdot i = c_4 \cdot \phi \cdot i$ y el momento amortiguador $M_{am} = F \cdot r$. Sustituyendo obtenemos finalmente

$$M_{am} = c_5 \cdot \phi \cdot i = c_6 \cdot \gamma \cdot \phi^2 \cdot v = C \cdot \gamma \cdot \phi^2 \frac{d\alpha}{dt}$$

En conclusión: el momento amortiguador M_{am} es proporcional a la conductividad del segmento, al cuadrado del flujo magnético que atraviesa el segmento y a la velocidad angular del segmento entre los polos del imán.

En instrumentos magnetoelectricos el momento amortiguador se obtiene utilizando el movimiento del carrete de aluminio, sobre el cual está bobinada la bobina móvil, dentro del campo magnético del imán permanente, propio del sistema. Este carrete de aluminio forma una espira en cortocircuito. La figura III-37 muestra el carrete cuya resistencia eléctrica es

$$R = \frac{\rho \cdot 1}{d \cdot c} = \frac{\rho \cdot 2(a + b)}{d \cdot c} \Omega$$

donde

ρ es la resistencia específica del material del carrete,

a, b el largo y la altura del carrete,

c el ancho del carrete,

d es el espesor del material del carrete

Cuando la bobina móvil gira en el campo magnético del imán, de inducción B , en el carrete se genera la fem inducida

$$e = B \cdot a \cdot b \cdot \frac{d\alpha}{dt}$$

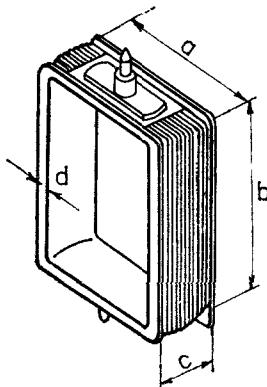


Figura III-37.

La intensidad de corriente que circula por la espira formada por el carretones es

$$i = \frac{e}{R} = \frac{B \cdot a \cdot b}{R} \frac{d\alpha}{dt}$$

La fuerza de frenado del carrete es $F = B \cdot i \cdot b$ y el momento amortiguador

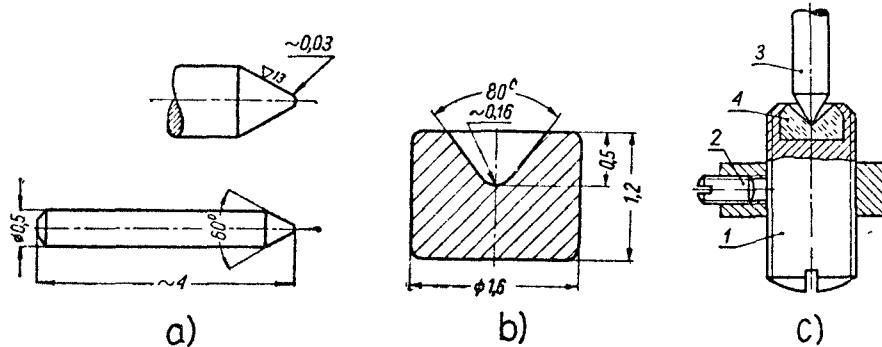
$$M_{am} = F \cdot a = B \cdot i \cdot b \cdot a = \phi \cdot i$$

Pivotes y suspensiones

La calidad y la clase de exactitud del instrumento están, en parte, condicionadas por la fricción que afecta la parte móvil durante su movimiento. El momento de fricción (M_f) no es constante, sino que va en constante aumento a medida que el instrumento sufre un proceso de paulatino desgaste debido a su uso. Los fabricantes de instrumentos de medición solucionan este problema empleando la parte móvil de tipo pivotado o suspendido.

El pivote más frecuentemente usado es la punta cónica (figu-

ra III-38 a). El pivote gira apoyado en un cojinete (fig. III-38 b) confeccionado con un tipo especial de acero, o rubí o corundo sintéticos. El conjunto se ve en la figura III-38 c.



- 1 — tornillo porta-cojinete
- 2 — prisionero
- 3 — pivote cónico
- 4 — cojinete

Figura III-38.

Los pivotes de punta cilíndrica redondeada en su extremo y apoyada sobre una piedra plana (fig. III-39) se utilizan en instrumentos con parte móvil pesada y en instrumentos que tienen que soportar vibraciones o choques. En algunos instrumentos se coloca el cojinete sobre

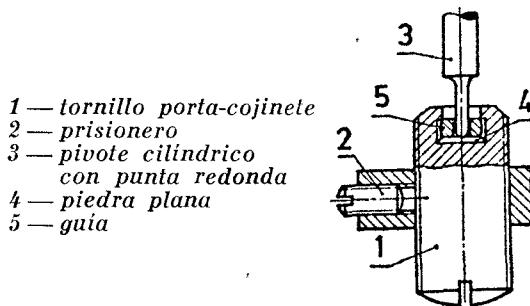


Figura III-39.

la parte móvil y los pivotes son fijos, lo que facilita el reemplazo de los pivotes gastados (fig. III-40). La figura III-41 muestra una construcción especial (Hartman & Braun) en la que la parte móvil del instru-

mento cuelga, mediante un pivote cónico, sobre un cojinete superior. El cojinete inferior sirve como guía, protegiendo únicamente contra movimientos laterales de la parte móvil. En este sistema no influye la dilatación del eje de la parte móvil causada por calor.

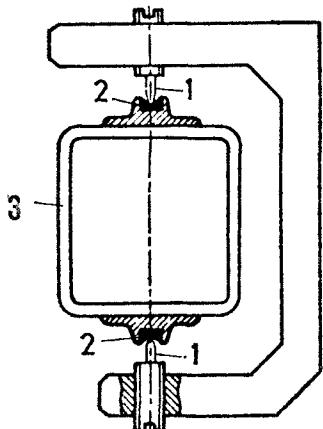


Figura III-40.

- 1 — pivote cónico
- 2 — cojinete
- 3 — parte móvil

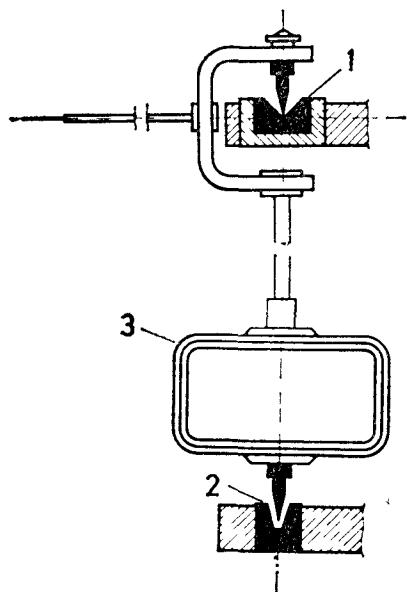


Figura III-41.

- 1 — cojinete superior
- 2 — cojinete inferior
- 3 — parte móvil

En instrumentos con la parte móvil suspendida se emplean dos sistemas. Uno de ellos es el que muestra la figura III-42 y consiste en suspender la parte móvil (1) entre dos cintas elásticas (2) tensadas mediante dos tensores (3). Este sistema presenta grandes ventajas: 1) el instrumento es insensible a los choques y vibraciones, y 2) la posición de trabajo no tiene tanta importancia como sucede en instrumentos pivotados. El momento antagonista M_a lo proporcionan ambas cintas. En este tipo de instrumentos, el momento de fricción es igual a cero y, por tanto, el error es de valor constante. Por lo general, en lugar de la aguja indicadora se utiliza el sistema óptico con el espejo fijado a la parte móvil del instrumento. El sistema de la doble suspensión se utiliza en instrumentos de clase 0,1 y 0,2.

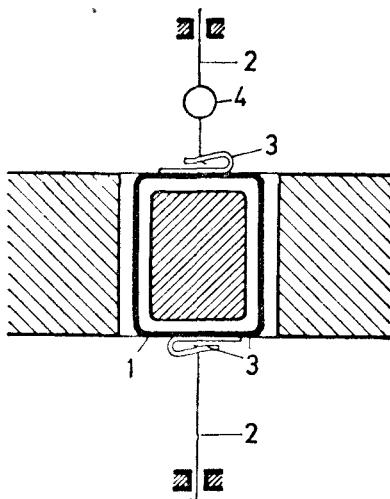


Figura III-42.

1 — parte móvil del instrumento
2 — cinta de suspensión
3 — tensor
4 — espejo

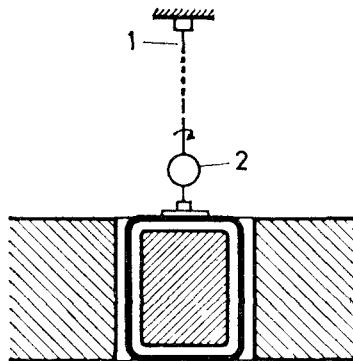


Figura III-43.

1 — cinta de suspensión
2 — espejo

La figura III-43 muestra el otro sistema que consiste en una libre suspensión de la parte móvil sobre una sola cinta sin tensores. El momento motor (M_m) requerido por este sistema es de muy bajo valor y, por tanto, se lo emplea en galvanómetros. El instrumento con la suspensión simple de la parte móvil es muy sensible a su posición de trabajo. Para facilitar su colocación, en la posición correcta, está provisto de un nivel de agua y tornillos de ajuste de la base.

Capítulo IV

INSTRUMENTOS MAGNETOELECTRICOS

Reciben esta denominación los instrumentos de medición en los cuales la desviación de la aguja indicadora (o del espejo) se produce debido a la acción recíproca de dos campos magnéticos; uno producido por un imán permanente y el otro por los ampervueltas de una bobina. Uno de los mencionados campos es fijo y el otro móvil. Los instrumentos magnetoeléctricos se clasifican en instrumentos de bobina móvil e instrumentos de imán móvil, según cuál de los campos sea fijo y cuál sea móvil. El principio de funcionamiento es el mismo para ambos tipos, pero su construcción y aplicaciones son diferentes. El sistema magnetoeléctrico de bobina móvil e imán fijo se emplea en la construcción de instrumentos de alta precisión y son de alto costo; en cambio, el sistema de imán móvil y bobina fija se utiliza en la construcción de instrumentos magnetoeléctricos de bajo costo, los cuales se utilizan en mediciones que no requieren gran precisión. Actualmente los instrumentos magnetoeléctricos se utilizan, casi exclusivamente, de bobina móvil en sus múltiples variantes que permiten emplearlos para mediciones, tanto de corriente continua como de alterna. Siguiendo estas consideraciones se pueden agrupar los instrumentos magnetoeléctricos de la siguiente manera:

1. Magnetoeléctricos de bobina móvil.
2. Magnetoeléctricos de bobina móvil con rectificador.
3. Magnetoeléctricos de bobina móvil con termoelemento-Termoelectricos.
4. Magnetoeléctricos de imán móvil.
5. Magnetoeléctricos diferenciales-Logómetros.

Instrumentos magnetoeléctricos de bobina móvil

En el sistema de bobina móvil, el imán permanente y la bobina son la parte fija y la parte móvil respectivamente. La figura IV-1 muestra la distribución de estos elementos principales. Entre los polos (1) del imán permanente está colocado un núcleo cilíndrico (2) confeccionado de un material magnético de baja remanencia. El entrehierro

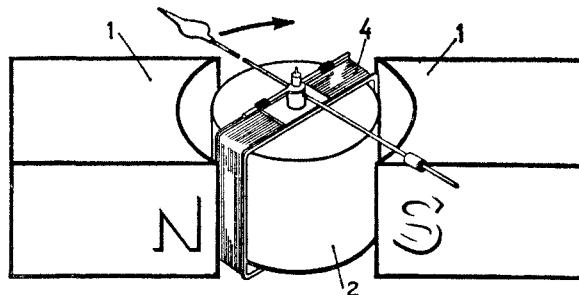


Figura IV-1.

formado entre el núcleo cilíndrico y los polos del imán es uniforme y, por tanto, podemos considerar que la inducción magnética B existente en este entrehierro es también constante y uniforme. La bobina móvil (4) está colocada de tal manera que puede girar alrededor del cilindro (2) moviendo dos de sus lados en el entrehierro. En la figura IV-2 vemos un instrumento completo compuesto del sistema motor y del sistema indicador. En la figura IV-3 se puede observar en detalle los elementos constructivos.

Las piezas polares (3) confeccionadas de acero dulce están fijadas a los polos de un imán permanente (1). Entre las piezas polares está ubicado el núcleo cilíndrico (2) también confeccionado de un material de muy baja remanencia. De esta manera se realiza un circuito magnético compuesto de los elementos 1-2-3 con un entrehierro de 2 a 3 mm de longitud, ubicado entre las piezas polares y el núcleo cilíndrico. La bobina móvil (4) está bobinada sobre un marco de aluminio (5), a la cual están fijadas las puntas de eje (6). A la punta de eje superior ha sido fijada la aguja indicadora (7). La bobina móvil, junto con la aguja indicadora, puede girar en un ángulo de 90° aproximadamente. Las dos espirales (8) confeccionadas de una cinta de bronce fosforoso tienen dos finalidades: una es la conexión eléctrica de la bobina móvil y, la otra, originar el momento antagonista. Las pesas (9) sirven como contrapesos para el equilibrio estático de la parte

móvil. La palanca (10) se utiliza para ajuste de la aguja indicadora en posición cero. El amortiguamiento se obtiene mediante las corrientes de Foucault generadas en el carrete de aluminio durante el movimiento de la bobina (ver Capítulo III).

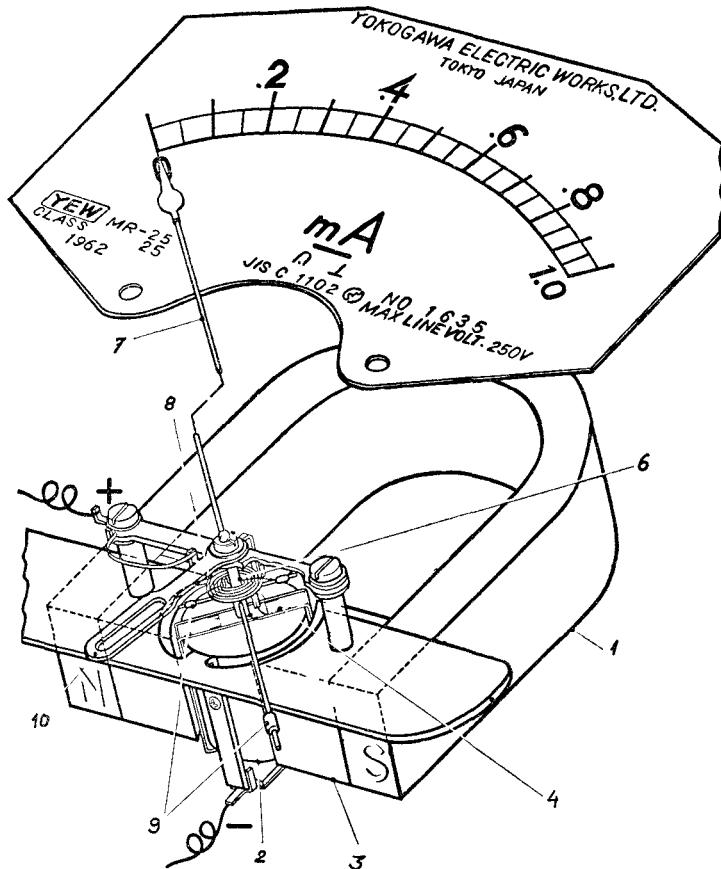


Figura IV-2.

En instrumentos de alta sensibilidad y en galvanómetros, la parte móvil (bobina) está suspendida de cintas elásticas. La suspensión elimina casi totalmente el momento de fricción originado en los cojinetes.

En los últimos años algunas firmas como Taylor, Simpson, introdujeron en el mercado instrumentos magnetoeléctricos en los cuá-

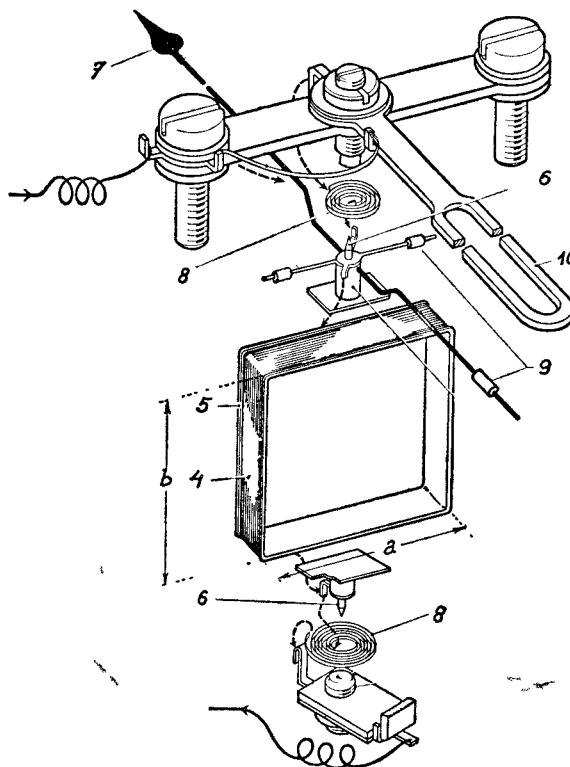


Figura IV-3.

les el núcleo central está formado por el imán permanente y el circuito magnético se cierra a través de un cilindro externo confeccionado de material de baja remanencia. Esta diferencia en la distribución de los principales elementos del sistema simplifica su construcción presentando al mismo tiempo las siguientes ventajas:

1. Es posible obtener un ángulo de desviación muy grande (hasta 270°), lo cual permite el empleo de una escala circular (fig. IV-4).
2. El cilindro exterior, a la vez que forma parte del circuito magnético, sirve como blindaje protector contra campos magnéticos exteriores.
3. El espacio circular que ocupa el sistema es reducido en comparación al del sistema tradicional descrito anteriormente.
4. El flujo magnético en su totalidad atraviesa el entrehierro. En un sistema tradicional no se puede evitar la dispersión de los flujos.

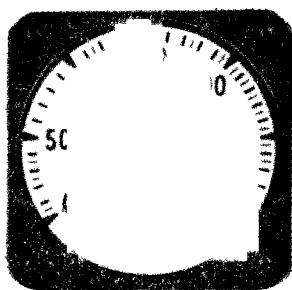


Figura IV-4.

La figura IV-5 muestra el despiece de este tipo de instrumento donde: 1, imán permanente central; 2, cilindro exterior no remanente; 3, espiras de la bobina móvil; 4, carrete de aluminio; 5, cojinete; 6, espiral antagonista; 7, punta de eje; 8, corrector de cero; 9, contrapeso.

Las ventajas mencionadas en los puntos 1 a 4 hacen esta variante muy conveniente para la construcción de instrumentos de tablero.

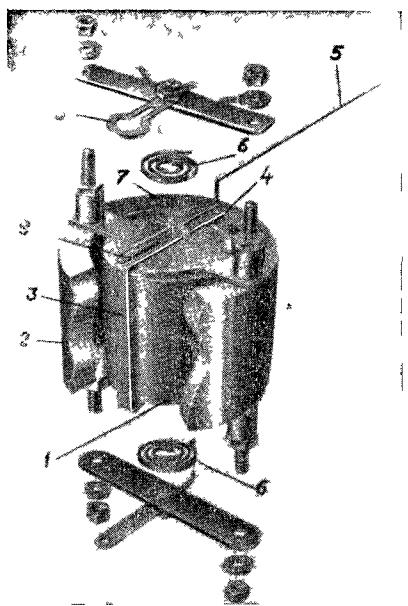


Figura IV-5.

MOMENTO MOTOR

La fórmula del momento motor del instrumento magnetoeléctrico se puede deducir de distintos modos. Es sabido que, debido a la corriente que circula a través de la bobina, ésta tiende a colocarse en una posición en la cual el flujo magnético de la bobina se sume al flujo magnético del imán. La magnitud y el sentido de las fuerzas que actúan sobre los lados de la bobina ubicados en el entrehierro dependen de la intensidad de corriente I que circula a través de la bobina, de la inducción magnética B en el entrehierro y del número de espiras de la bobina (de acuerdo con la Ley Biot-Savart). Con la ayuda de la regla de la mano izquierda se puede establecer fácilmente que la

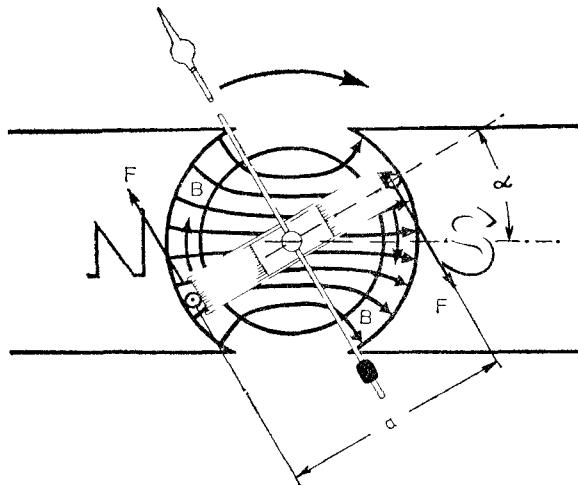


Figura IV 6.

fuerza F es perpendicular al sentido de las líneas de fuerza de la inducción magnética B y al conductor de la bobina. El brazo del par de fuerzas es igual al ancho de la bobina a (fig. IV-6) y, en consecuencia, el momento motor (M'_m) que actúa sobre una espira será:

$$M'_m = F \cdot a = B \cdot I \cdot b \cdot a = B \cdot I \cdot S$$

donde: B es la inducción magnética en el entrehierro

I es la intensidad de corriente que circula por la bobina

a es el ancho de la bobina

b es la altura de la bobina

$S = b \cdot a$ es la sección activa de la bobina por la cual atraviesa el flujo magnético.

El momento motor (M_m) que actúa sobre la bobina de n número de espiras, es n veces mayor que el momento M'_m de una espira:

$$M_m = B \cdot I \cdot S \cdot n$$

Cuando las fuerzas sean perpendiculares a los lados de la bobina, el valor del momento motor no sufrirá variaciones al girar la bobina en un ángulo α , cuando la inducción magnética B en el entrehierro es constante. El momento antagonista M_a que se origina por acción de la espiral (o espirales o cintas de suspensión), es proporcional al ángulo de giro α de la parte móvil y a la constante m de la espiral. Como es sabido, esta constante depende del material y de las dimensiones de la espiral

$$M_a = m \cdot \alpha$$

La desviación de la parte móvil es proporcional a la intensidad de corriente que circule por la bobina móvil. Se denomina "Intensidad de consumo" del instrumento el valor de la corriente que produce la desviación máxima de la parte móvil. Esta desviación máxima está determinada por la escala.

La aguja indicadora se detiene en una posición que corresponde al estado de equilibrio, o sea, cuando los dos momentos, motor y antagonista, son iguales:

$$\Sigma M = M_m + (-M_a) = 0, \quad \text{o} \quad M_m = M_a$$

Sustituyendo $B \cdot I \cdot S \cdot n = m \cdot \alpha$ obtenemos: $\alpha = \frac{B \cdot I \cdot S \cdot n}{m} = C \cdot I$

La desviación de la bobina móvil es proporcional a la intensidad de corriente. Esta desviación se determina mediante la aguja indicadora fijada a la bobina móvil. La escala del instrumento puede ser contrastada directamente en unidades de corriente o en unidades de la magnitud eléctrica que actúe sobre el traductor donde se transforma en c.c.

El gráfico de la figura IV-7 representa la desviación de la parte móvil en función del momento motor y del momento antagonista. Las divisiones de la escala, cada una de las cuales corresponde a la unidad de magnitud medida, son uniformes y, por tanto, la escala es uniforme, figura IV-8, siempre y cuando la inducción magnética en el entrehierro sea uniforme $\left(C = \frac{B \cdot S \cdot n}{m} \right)$. La menor irregularidad o deformación del entrehierro producida por un descentrado del núcleo causará la desigualdad de la escala.

En el caso de conectar el instrumento a la corriente alterna, el momento motor cambiará su sentido dos veces durante cada ciclo. El período de oscilación de la parte móvil de un instrumento magne-

toeléctrico común es relativamente largo (0,2 a 2 s.) en comparación con la duración del período de la frecuencia industrial (0,016 a 0,02 segundo); en consecuencia el sistema no producirá desviación alguna. El instrumento magnetoeléctrico común mide la corriente continua únicamente.

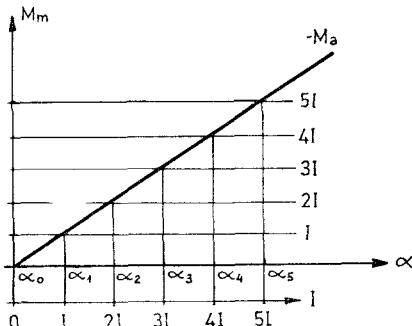


Figura IV-7.

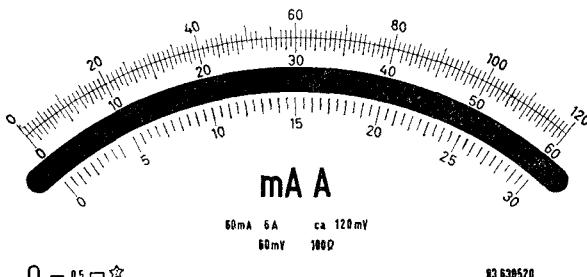


Figura IV-8.

VOLTÍMETRO MAGNETOELÉCTRICO

La figura IV-9 muestra el esquema del circuito de un voltímetro magnetoeléctrico. El circuito está compuesto por las siguientes resistencias: la resistencia de la bobina móvil R_b , las resistencias de las espirales antagonistas R_e y la resistencia adicional R_a . En consecuencia, la resistencia total del circuito voltmétrico será:

$$R_v = R_b + 2R_e + R_a$$

La máxima desviación de la bobina y de la aguja indicadora se produce al circular la corriente nominal por la bobina móvil. Esta co-

rriente nominal tiene un valor determinado que no debe ser excedido debido a las variaciones que se producirían en las espirales y en la bobina. Como es sabido, el módulo de elasticidad de las espirales depende de la temperatura de las mismas. La corriente que circule a través de las espirales produce su calentamiento (I^2R_e). Además, si la

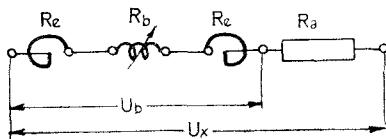


Figura IV-9.

intensidad de corriente llegara a ser excesiva, produciría un aumento considerable de la resistencia del alambre de cobre empleado en la confección de la bobina. Siendo este alambre de diámetro reducido (0,015 a 0,05 mm), será muy sensible a los efectos del aumento de la intensidad de corriente.

La intensidad de corriente nominal se determina por la fórmula siguiente:

$$I_v = \frac{U_{\text{nom}}}{R_v} = \frac{U_{\text{nom}}}{R_b + 2R_e + R_a}$$

siendo la resistencia eléctrica de ambas espirales ($2R_e$) de valor reducido, se la puede omitir

$$I_v = \frac{U_{\text{nom}}}{R_b + R_a}$$

donde: U_{nom} es el alcance de tensión del voltímetro

R_b es la resistencia de la bobina móvil (cobre)

R_a es la resistencia adicional (manganina o constantan).

La desviación α de la parte móvil es proporcional a la intensidad de corriente que circula por la bobina

$$\alpha = C \cdot I_v \quad I_v = \frac{\alpha}{C}$$

Sustituyendo este valor en la ecuación anterior obtenemos

$$\frac{\alpha}{C} = \frac{U_{\text{nom}}}{R_b + R_a} \quad \alpha = C \cdot \frac{U_{\text{nom}}}{R_b + R_a}$$

la desviación máxima que corresponde a la tensión nominal del alcance del voltímetro.

La desviación de la aguja correspondiente al valor de la tensión que se mide será

$$\alpha_x = C \cdot \frac{U_x}{R_b + R_a}$$

Cuando la temperatura es constante, las resistencias R_b y R_a son también constantes. En este caso la constante del voltímetro será

$$C_1 = \frac{C}{R_b + R_a} \quad \text{y} \quad \alpha_x = C_1 \cdot U_x$$

El valor de las resistencias R_b y R_a varía a medida que varía la temperatura dentro del instrumento. Cuando esta variación es considerable entra en juego un error adicional de lectura denominado "error de temperatura". Con el objeto de reducir este error se utilizan materiales tales como manganina o constantan, en fabricación de resistencias adicionales, pues la resistencia específica de estos materiales no resulta casi afectada por la temperatura. La resistencia de la bobina móvil (R_b) es de bajo valor en comparación con el valor de la resistencia adicional R_a , como podemos ver en el ejemplo que se da a continuación. Por tanto, se puede mantener el error del instrumento dentro de los límites determinados por la clase de exactitud del mismo. En algunos voltímetros se confecciona la resistencia adicional de material de resistencia específica negativa, lo que permite compensar el incremento de la resistencia de la bobina móvil producido por la temperatura.

La resistencia adicional puede ser interior o exterior al instrumento. La figura IV-10 muestra una resistencia adicional exterior y la figura IV-11 un voltímetro con resistencias adicionales interiores.

Ejemplo: Calcular las resistencias adicionales para 3 alcances del voltímetro. Datos sobre el instrumento: resistencia de la bobina móvil $R_b = 10 \Omega$, intensidad máxima correspondiente a la desviación máxima $I_{nom} = 10 \text{ mA}$. La escala es de 150 divisiones.

El instrumento sin resistencia adicional puede medir tensión hasta el valor

$$U_o = 0,010 \cdot 10 = 0,1 \text{ V.}$$

Para poder utilizar el instrumento en mediciones de tensión hasta 150 V, la resistencia total entre bornes que se conectan debe tener el valor

$$R_b + R_a' = \frac{150}{0,01} = 15.000 \Omega$$

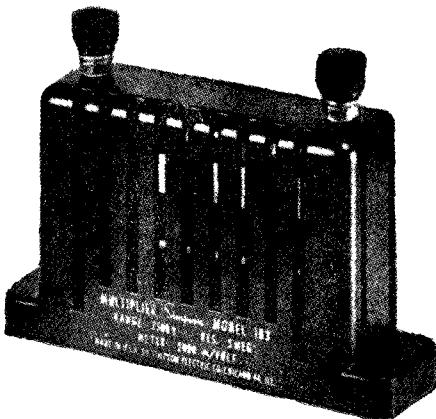


Figura IV-10.

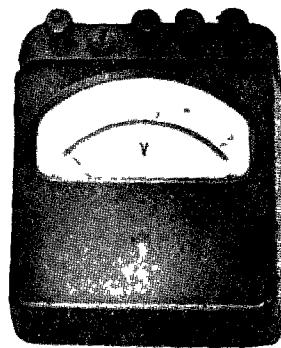


Figura IV-11.

La resistencia adicional utilizada para este alcance será

$$R_a = 15.000 - 10 = 14.990 \Omega$$

La constante de lectura en este alcance del voltímetro es

$$C_{150} = \frac{150 \text{ V}}{150 \text{ div.}} = 1 \text{ V/1 div.}$$

La resistencia adicional para el alcance de 300 V será

$$R_b + R_a' + R_a'' = \frac{300 \text{ V}}{0,01 \text{ A}} = 30.000 \Omega$$

$$R_b + R_a' = 15.000 \Omega; R_a'' = 15.000 \Omega$$

La constante de lectura del segundo alcance es

$$C_{300} = \frac{300 \text{ V}}{150 \text{ div.}} = 2 \text{ V/div.}$$

Para el tercer alcance, o sea, de 450 V, la resistencia adicional R''' es también de 15.000 Ω , la constante de lectura es

$$C_{450} = \frac{450 \text{ V}}{150 \text{ div.}} = 3 \text{ V/div.}$$

La figura IV-12 muestra el esquema de conexiones del voltímetro.

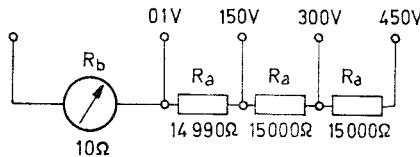


Figura IV-12.

AMPERÍMETRO MAGNETOELÉCTRICO

El amperímetro mide la intensidad de corriente en el circuito y, por ende, se lo conecta en serie con la fuente y con el receptor. En consecuencia, la corriente que se mide debería pasar en su totalidad a través del amperímetro. Como ya es sabido, la bobina móvil del instrumento está confeccionada con alambre muy fino (0,015 a 0,05 mm de diámetro), y las espirales antagonistas son de sección muy reducida, condiciones que limitan la intensidad admisible. La intensidad máxima en el circuito de la bobina móvil raramente excede los 100 mA, valor que depende del modelo del instrumento. La conexión directa, figura IV-13, se utiliza en miliamperímetros de muy bajo alcance. Para alcances mayores se utiliza el sistema magnetoeléctrico en conjunto con una resistencia calibrada denominada *shunt*, conectada en paralelo al sistema, figura IV-14. En este conjunto la corriente I que se mide,

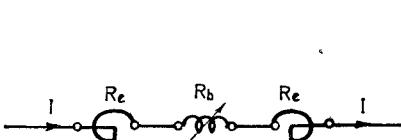


Figura IV-13.

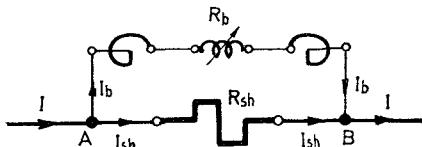


Figura IV-14.

se bifurca en el punto *A* en corrientes parciales: una I_b que circula por el ramal de la bobina móvil y la otra I_{sh} que circula por el shunt. La resistencia del shunt es muy pequeña en comparación con la resistencia del ramal de la bobina móvil. Observando el esquema de la figura IV-14, se puede considerar que el instrumento funciona como un milivoltímetro de resistencia R_b , que mide la caída de tensión sobre la resistencia R_{sh} .

Según la Segunda Ley de Kirchhoff tenemos:

$$I_{sh} \cdot R_{sh} = I_b \cdot R_b \quad (\text{omitiendo la resistencia de las espirales}).$$

$$I_{sh} = I_b \cdot \frac{R_b}{R_{sh}} ; \quad \text{la intensidad que se mide } I = I_{sh} + I_b = I_b \left(1 + \frac{R_b}{R_{sh}} \right)$$

considerando que ambas resistencias son aproximadamente constantes, tenemos:

$$I = I_b \cdot m$$

La constante m se denomina "multiplicador" correspondiente al alcance del amperímetro. La constante m se expresa

$$m = 1 + \frac{R_b}{R_{sh}} = \frac{I}{I_b}$$

En base a lo expuesto se puede calcular la resistencia del shunt

- a. Conociendo el multiplicador m y la resistencia del circuito de la bobina móvil R_b :

$$R_{sh} = \frac{R_b}{m - 1}$$

- b. Conociendo la intensidad admisible de la bobina móvil I_b , el margen de la intensidad a medir I y la resistencia del circuito de la bobina móvil R_b :

$$R_{sh} = \frac{I_b}{I - I_b} \cdot R_b$$

Ejemplo I: La resistencia del milivoltímetro es $R_b = 3 \Omega$; el multiplicador es: 10; 100; 1000.

$$R_{sh_1} = \frac{3}{10 - 1} = 0,333 \Omega ; \quad R_{sh_2} = \frac{3}{100 - 1} = 0,0303 \Omega ;$$

$$R_{sh_3} = \frac{3}{1.000 - 1} = 0,003 \Omega$$

Ejemplo II: La resistencia del instrumento es $R_b = 3 \Omega$; la intensidad admisible de la bobina es $I_b = 100 \text{ mA}$; la máxima intensidad de corriente a medir $I = 100 \text{ A}$.

$$R_{sh} = \frac{0,100}{99,9} \cdot 3 = 0,0010 \Omega$$

De lo expuesto resulta que las resistencias calibradas denominadas *shunt* tienen un valor resistivo muy bajo. Por lo general, están provistos de cuatro bornes al igual que las resistencias patrón (ver Capítulo I), lo cual permite evitar errores causados por la resistencia de contactos. La figura IV-15 muestra el esquema de conexiones del amperímetro con shunt a un circuito. A los bornes señalados con I se conecta el circuito y los bornes E sirven para la conexión del milivoltímetro. La disminución de la influencia de temperatura sobre la des-

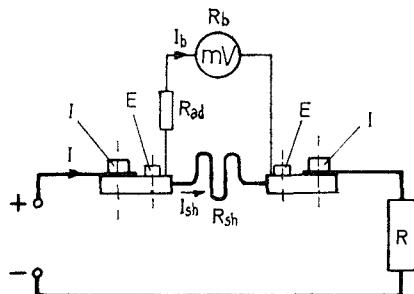


Figura IV-15.

viación del milivoltímetro, se obtiene intercalando una resistencia adicional R_{ad} de manganina, cuyo valor es alto en comparación con la bobina móvil R_b confeccionada con alambre de cobre.

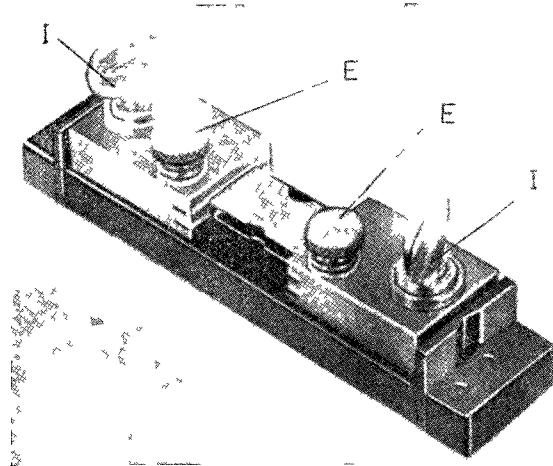


Figura IV-16.

De acuerdo con su ubicación, el shunt puede ser interno o externo al instrumento. Los shunt internos, o sea, colocados en el interior de la caja del instrumento se construyen para intensidades cuyo valor no exceda los 25 A. Para intensidades mayores se utilizan, casi exclusivamente, los shunt exteriores. En su fabricación se emplea manganina, material cuya resistencia varía poco con temperatura. La densidad de corriente que se admite en los shunt es del orden $0,6 \text{ A/mm}^2$. La figura IV-16 representa un shunt exterior.

Por lo general, los shunt que se utilizan con instrumentos portátiles o de laboratorio se prevén para una caída de tensión de 60 mV. Para instrumentos de tablero se emplean los shunt con caídas normalizadas: 30; 45; 60; 100; 120; 150; 300 mV. Los shunt se clasifican, según su exactitud en 5 clases: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5, y 1,0 %. Cuando el instrumento (milivoltímetro) se conecta con el shunt mediante cables, su calibración se efectúa en conjunto con los cables.

OHMETRO MAGNETOELÉCTRICO

El sistema magnetoeléctrico se utiliza también para la construcción de óhmetros, o sea, instrumentos que acusan directamente el valor de la resistencia medida. Un óhmetro consta de un sistema magnetoeléctrico indicador, de una fuente de energía —que, por lo general, es una pequeña pila Leclanche seca— y de un sistema regulador. Existen dos tipos de óhmetro magnetoeléctrico:

1. En el cual la resistencia a medir (R_x) se conecta en serie con el miliamperímetro.
2. En el cual la resistencia a medir (R_x) se conecta en paralelo al miliamperímetro.

La figura IV-17 muestra el esquema de conexiones correspondientes al primer sistema, en el cual la resistencia cuyo valor se está buscando,

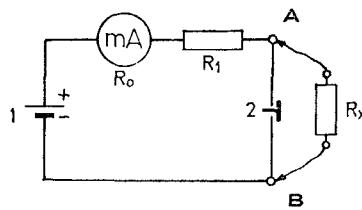


Figura IV-17.

do, está conectada en serie con el instrumento. El circuito se compone del miliamperímetro de resistencia R_0 , de una resistencia calibrada R_1 de manganina y de la fuente (1). La resistencia desconocida a medir R_x se conecta a los bornes A-B. El circuito se puede cerrar de dos maneras: 1) pulsando el interruptor (2), con lo cual se elimina la resistencia R_x , y 2) dejando el interruptor abierto para que se cierre el circuito a través de la resistencia R_x . La intensidad de corriente que

circula en el instante de pulsar el interruptor (2) se puede expresar, omitiendo el valor de la resistencia de la pila, por

$$I_{\max} = \frac{U}{R_0 + R_1}$$

Abriendo el interruptor (2) se intercala en el circuito la resistencia R_x , con lo cual la intensidad de corriente será

$$I_x = \frac{U}{R_0 + R_1 + R_x}$$

La relación entre estas dos intensidades es igual a la relación entre las desviaciones

$$\frac{I_x}{I_{\max}} = \frac{\alpha_x}{\alpha_{\max}} = \frac{R_0 + R_1}{R_0 + R_1 + R_x}$$

$$I_x = \frac{R_0 + R_1}{R_0 + R_1 + R_x} \cdot I_{\max}$$

Sustituyendo $R_0 + R_1 = R$ resulta

$$\frac{\alpha_x}{\alpha_{\max}} = \frac{R}{R + R_x} = \frac{1}{1 + \frac{R_x}{R}}$$

$$\alpha_x = \frac{1}{1 + \frac{R_x}{R}} \cdot \alpha_{\max}$$

De esta ecuación es fácil deducir que la desviación de la aguja indicadora no es proporcional a la magnitud medida y, por tanto, la escala no es uniforme, figura IV-18. En la escala se pueden determinar tres puntos característicos:

1. Cuando $R_x = 0$ (pulsador cerrado) $\alpha = \alpha_{\max}$
2. Cuando $R_x = \infty$ (entre los bornes A y B no está conectada resistencia alguna) ... $\alpha = 0$
3. Cuando $R_x = R = R_0 + R_1$ $\alpha = \frac{\alpha_{\max}}{2}$

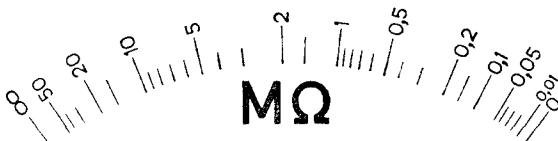


Figura IV-18.

Comparando las escalas de los instrumentos comunes (voltímetros, amperímetros) con la escala del óhmetro en serie, ésta resulta invertida; es decir, que la máxima desviación de la aguja indicadora coincide con el valor cero de la resistencia y, viceversa, la posición de reposo de la aguja corresponde al valor infinito de la resistencia.

En la figura IV-19 está representado el esquema utilizado con el segundo sistema, o sea, cuando la resistencia a medir R_x se conecta

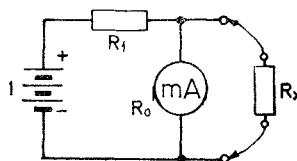


Figura IV-19.

en paralelo al miliamperímetro. Antes de conectar la resistencia a medir al óhmetro, la intensidad de corriente que circule por el miliamperímetro será

$$I_0 = \frac{U}{R_1 + R_0}$$

Cuando se conecta la resistencia a medir R_x en paralelo con el miliamperímetro, la intensidad de corriente I_x que circule por el instrumento será

$$I_x = \frac{U}{R_0 + \frac{R_1}{R_x} (R_0 + R_x)}$$

La relación entre ambas intensidades:

$$\frac{I_x}{I_0} = \frac{R_1 + R_0}{R_0 + \frac{R_1}{R_x} (R_0 + R_x)} = \frac{1}{1 + \frac{1}{R_x} \cdot \frac{R_0 R_1}{R_0 + R_1}} = \frac{1}{1 + \frac{R}{R_x}}$$

donde $R = \frac{R_0 \cdot R_1}{R_0 + R_1}$

Al comparar el óhmetro en serie con el óhmetro en paralelo se puede deducir que la escala de este último es invertida, figura IV-20, es decir que el cero de la escala está a la izquierda y el infinito a la

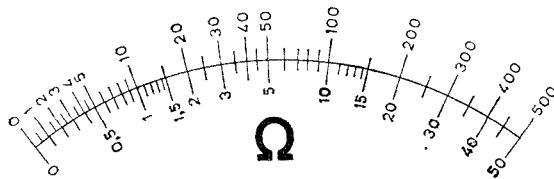


Figura IV-20.

derecha de la escala. La desviación correspondiente al valor de la resistencia medida R_x es

$$\alpha_x = \frac{1}{1 + \frac{R}{R_r}} \alpha_0$$

Como en el caso de óhmetro en serie, se pueden determinar tres puntos característicos de la escala:

1. Cuando $R_x = 0$ la desviación $\alpha = 0$
2. Cuando $R_x = \infty$ la desviación $\alpha = \alpha_{\max}$
3. Cuando $R_x = R$ la desviación $\alpha = \frac{\alpha_{\max}}{2}$

Los óhmetros en paralelo se utilizan para mediciones de resistencia inferiores a 1.000Ω y los en serie para mediciones de resistencias mayores. En un instrumento de tipo universal el cambio de conexión del “en serie” al “en paralelo” se efectúa mediante una llave selectora. La figura IV-21 muestra un facsímil de la escala en el cual la división superior corresponde a la conexión en serie ($M\Omega$) y las divisiones inferiores corresponden a la conexión en paralelo (Ω).

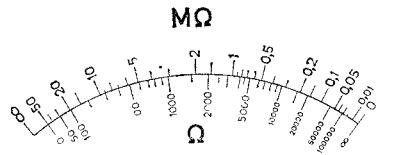


Figura IV-21.

Instrumentos magnetoeléctricos con rectificador

El sistema magnetoeléctrico presenta grandes ventajas con respecto a otros sistemas motor; tiene gran sensibilidad, no le afectan los campos magnéticos externos y resiste sobrecargas. El inconvenien-

te de este sistema es que funciona únicamente con corriente continua. Para utilizarlo en mediciones de corriente alterna se hace necesario agregar al sistema un traductor, o sea, un elemento que reciba las señales producidas por la corriente alterna y las transforme en señales de corriente continua. El traductor más frecuentemente utilizado consiste en un puente rectificador. En la construcción de puentes rectificadores para instrumentos se utilizan diodos semiconductores. La teoría de los semiconductores y sus propiedades es demasiado compleja para exponerla en este manual. Será suficiente considerar las características externas y algunos de los circuitos empleados en estos instrumentos magnetoeléctricos que trabajen en conjunto con el puente rectificador.

En instrumentos magnetoeléctricos con rectificador se utilizan dos tipos de diodos: metálicos y de germanio.

El diodo denominado metálico, figura IV-22, consiste en una pastilla de cobre (2), la cual tiene sobre una de sus caras una capa de óxido cuproso (Cu_2O) formada mediante un tratamiento térmico es-

- 1 — capa de óxido cuproso
- 2 — placa de cobre
- 3 — placa de contacto
- 4 — resorte

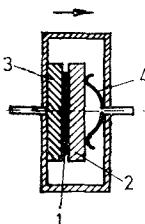


Figura IV-22.

pecial, que es semiconductor. La resistencia R_d denominada directa o de paso, que actúa en sentido desde óxido hacia cobre puro, es muy pequeña; en cambio, la resistencia R_{in} denominada inversa o de bloqueo, que actúa en sentido desde cobre hacia óxido, es muy alta. La relación entre estas dos resistencias oscila entre 600 y 1.000 para este tipo de diodo. Estas resistencias características del diodo dependen no solamente del sentido de la corriente, sino también del valor de la tensión aplicada que, por lo general, no debe ser mayor que 1 V.

La figura IV-23 muestra un diodo de germanio. La pequeña placa de germanio de 0,3 mm de espesor y de 1 a 3 mm^2 de superficie, se halla dentro de una pequeña ampolla de vidrio, al vacío. Completa el diodo una punta metálica de molibdeno o de tungsteno, de un diámetro aproximado de 0,06 mm. La resistencia directa o de paso de

este diodo es del orden de $40\ \Omega$ y la resistencia inversa o de bloqueo de $600\ M\Omega$.

- 1 — cristal de germanio
- 2 — punta metálica
- 3 — ampolla de vidrio
- 4 — estaño
- 5 — conductores

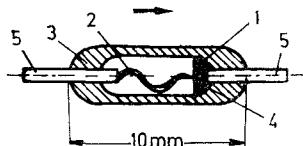


Figura IV-23.

De la comparación de ambos tipos de diodos obtenemos como características principales:

Para los diodos cuprosos la relación

$$\frac{R_{inv}}{R_d} = 600 \text{ a } 1.000$$

Para los diodos de germanio la relación

$$\frac{R_{inv}}{R_d} = 4.000 \text{ a } 5.000$$

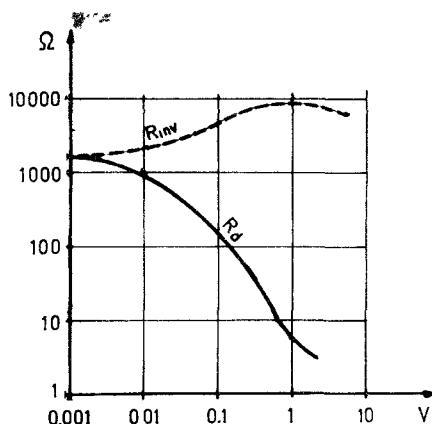


Figura IV-24.

Según lo mencionado, ambas resistencias dependen no sólo del sentido de la corriente, sino también del valor de la tensión aplicada. El gráfico de la figura IV-24 muestra cómo varían ambas resistencias en función de la tensión. La resistencia directa R_d disminuye a medi-

da que aumenta la tensión aplicada; en cambio, la resistencia inversa R_{inv} se mantiene casi constante.

La durabilidad y la calidad del trabajo del diodo semiconductor dependen de la temperatura. Por lo general, la temperatura admisible para ambos tipos de diodos es de 50 °C. En instrumentos de medición con rectificadores la intensidad de corriente no excede 1 mA.

RECTIFICACIÓN DE LA CORRIENTE EN INSTRUMENTOS

El sistema traductor más sencillo consiste en un diodo rectificador conectado en serie con el sistema indicador (miliamperímetro). La figura IV-25 a muestra el circuito correspondiente, el cual está com-

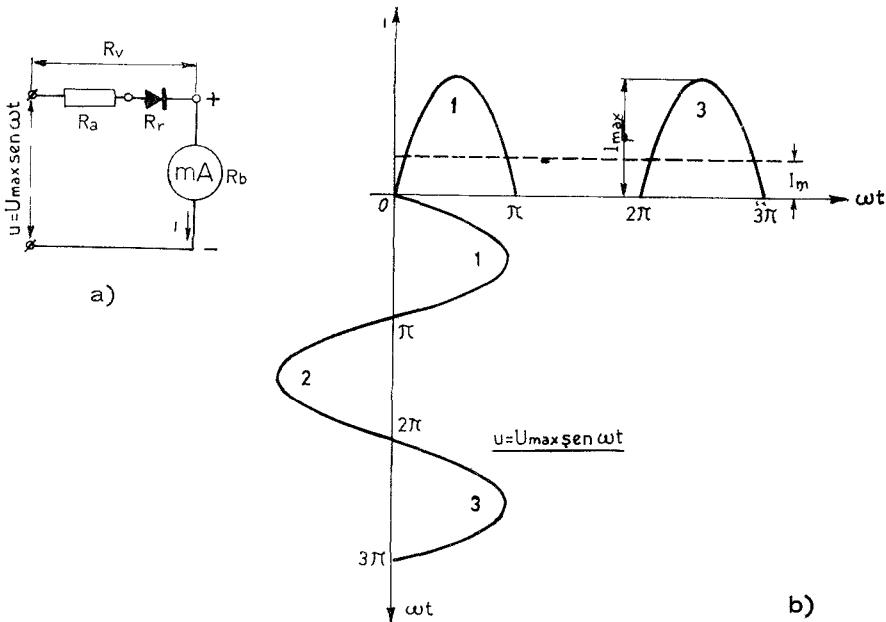


Figura IV-25.

puesto por un miliamperímetro magnetoeléctrico cuya bobina tiene la resistencia R_b , un diodo semiconductor cuya resistencia de paso es R_d y una resistencia adicional R_a .

De lo mencionado anteriormente sabemos que la resistencia directa (de paso) del diodo depende de la tensión aplicada, mientras

que la resistencia adicional y de la bobina móvil (R_a y R_b) no dependen de la tensión. Además, esta resistencia del diodo es muy pequeña en comparación con el resultado de la suma de la resistencia adicional con la resistencia de la bobina

$$R_d \ll (R_a + R_b)$$

De esto surge que la resistencia total que ofrece el circuito del instrumento R_v depende en grado mínimo de la tensión (R_d es inapreciable en comparación con $R_a + R_b$) y, por tanto, la corriente i que circula por el instrumento es de relación lineal.

Cuando la tensión medida u es senoidal ($u = U_{\max} \operatorname{sen} \omega t$), el valor instantáneo de la corriente i en el ciclo de conducción es

$$i = \frac{u}{R_v} = \frac{U}{R_v} \cdot \operatorname{sen} \omega t = I_{\max} \operatorname{sen} \omega t$$

La corriente i que circula a través del diodo mantiene la misma forma de onda; la corriente en el período de no conducción es irrelevante. En el gráfico de la figura IV-25 b se aprecia el valor instantáneo de la corriente de conducción del diodo en función del valor instantáneo de la tensión senoidal. La señal de corriente aparece solamente en la mitad del ciclo. La desviación de la bobina móvil del miliamperímetro depende del valor medio de la señal de corriente rectificada. Como es sabido, el valor medio de la corriente I_m se expresa

$$I_{\max} = \frac{U_{\max}}{R_v}; \quad I_m = \frac{U_{\max}}{\pi \cdot R_v} = \frac{I_{\max}}{\pi} = 0,32 \cdot I_{\max}$$

El sistema descrito presenta ciertos inconvenientes. El valor medio de la corriente (I_m) es bajo ($0,32 I_{\max}$) y, por tanto, la desviación de la parte móvil resulta pequeña. Además, sólo la media onda está cargada, lo cual causa deformaciones alineales. En vista de estos inconvenientes, el sistema de rectificación de media onda se emplea en instrumentos de poca exactitud.

La rectificación de onda completa es el método más común para rectificar la corriente alterna en instrumentos magnetoeléctricos. La figura IV-26 muestra el esquema de conexiones del instrumento magnetoeléctrico con rectificadores. La rectificación se obtiene mediante cuatro diodos (1, 2, 3, y 4) conectados en puente. La corriente instantánea i circula en la primera media onda a través de la resistencia adicional R_a , diodo 1, miliamperímetro magnetoeléctrico (mA) y diodo 3. En la segunda media onda circula por el diodo 4, miliamperímetro, diodo 2 y resistencia adicional R_a . Para ambas medias ondas de

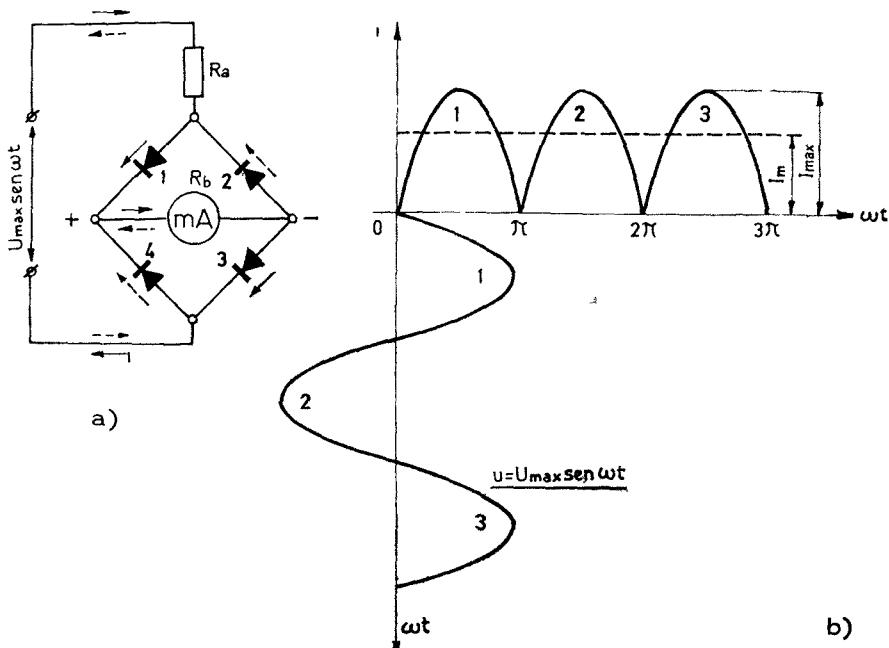


Figura IV-26.

la tensión alterna aplicada, la corriente i circula a través del instrumento en el mismo sentido.

Sobre el instrumento magnetoeléctrico indicador actúan impulsos senoidales de corriente, todos en el mismo sentido y del mismo valor

$$I_{\max} = \frac{U_{\max}}{R_v}$$

Como es sabido, estos impulsos son equivalentes al valor medio (I_m), que vale doble en comparación con el caso de rectificación de media onda

$$I_m = 2 \cdot \frac{U_{\max}}{\pi \cdot R_v} = \frac{2}{\pi} \cdot I_{\max} = 0,64 I_{\max}$$

La desviación de la parte móvil de un sistema magnetoeléctrico, conectado a la corriente alterna a través de un rectificador de onda completa (puentes), es proporcional al valor medio de la corriente rectificada.

Se utilizan dos tipos de puente rectificador en conjunto con instrumentos magnetoeléctricos: *a)* de cuatro diodos (1-2-3-4, fig. IV-27 a), y *b)* de dos diodos (1-4) y dos resistencias (2-3), figura IV-27 b. La característica de la escala de estos instrumentos depende de la relación entre la resistencia del puente rectificador y la resistencia total del instrumento (resistencia del sistema magnetoeléctrico más la re-

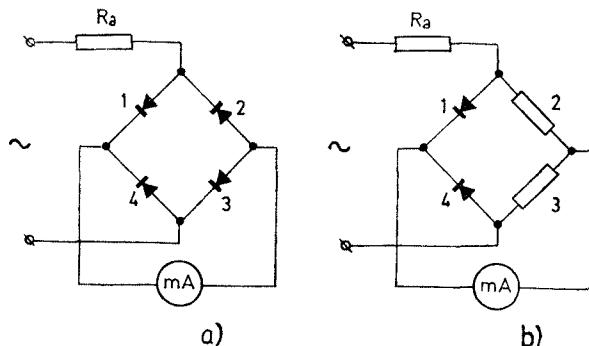


Figura IV-27.

sistencia adicional R_o). Los voltímetros de alcances bajos (la resistencia adicional R_o es de valor pequeño) no tienen escala uniforme, en cambio, los voltímetros para alcances mayores de 20 V tienen características casi lineales. Esto se debe a altos valores de resistencias adicionales de manganina (fig. IV-28).

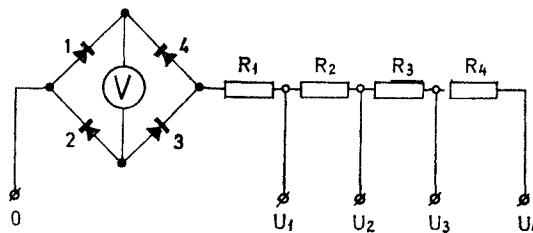


Figura IV-28.

Para utilizar el sistema magnetoeléctrico, en calidad de milíamperímetro de corriente alterna, se conecta según el esquema de la figura IV-29 a. Para amperímetros es imprescindible utilizar un shunt

(figura IV-29 b). El inconveniente que trae este tipo de amperímetro es la necesidad de producir sobre el shunt una caída de tensión considerable, la cual debe ser de 1 V aproximadamente. Esta caída de tensión tan considerable, cuando se trata de un amperímetro, se debe a que en el puente siempre actúan dos diodos en serie y a la existencia de

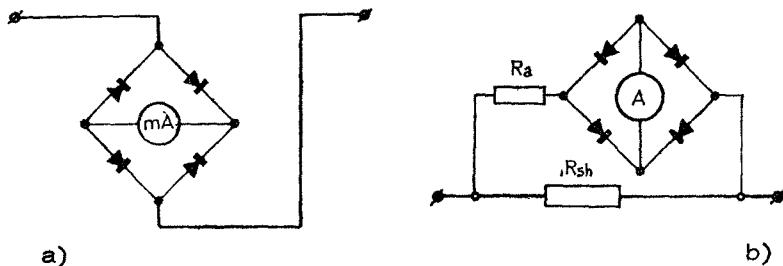


Figura IV-29.

una resistencia adicional (R_a) en el circuito del sistema magnetoeléctrico. La escala de este tipo de amperímetro tiene la característica casi lineal en la mayor parte de su longitud, lo cual se aprecia claramente en facsímil de la figura IV-30.

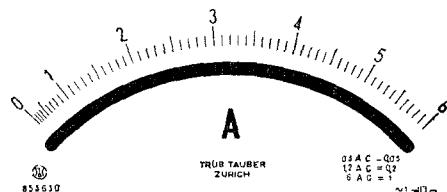


Figura IV-30.

El sistema magnetoeléctrico con rectificador se presta especialmente para emplearlo en instrumentos universales como voltamperímetros para corriente continua y alterna. La figura IV-31 muestra un esquema de un voltamperímetro universal, basado sobre este principio. El cambio de posición del selector (1) convierte el instrumento de corriente continua en instrumento de corriente alterna.

INSTRUMENTOS MÚLTIPLES

El instrumento múltiple portátil es de uso muy difundido en toda clase de talleres de reparaciones, en secciones de mantenimiento, siendo también de gran utilidad como instrumento auxiliar en laborato-

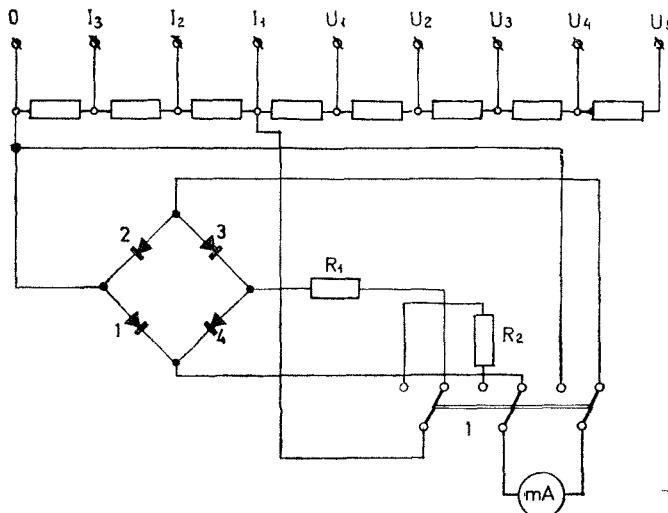


Figura IV-31.

rios. Por lo general, se le da el nombre de "Multitester", "tester" o "probador de circuitos".

El instrumento múltiple se compone de un sistema magnetoeléctrico, un puente rectificador, un cierto número de resistencias calibradas, una o varias pilas y uno o varios selectores. Además, está provisto de varios bornes de conexión. Estos instrumentos múltiples portátiles están fabricados por varias firmas bajo distintos nombres y en diferentes variantes según el uso específico previsto. La figura IV-32 muestra un ejemplo de este tipo de instrumento, fabricado por Hartmann & Braun, bajo el nombre de "Elavi 3", diseñado de tal manera que puede servir para varios tipos de servicio, tanto en tecnología de potencia, como también en comunicaciones. En la figura IV-33 se ve su escala en tamaño natural. El selector (1) tiene 3 posiciones: 1.^a, para mediciones en corriente continua; 2.^a, para utilizar el instrumento en calidad de óhmetro, y 3.^a, para mediciones en corriente alterna. Como fuente para uso como óhmetro tiene pilas secas internas de 1,5 V. El selector (2) escoge el margen de medición.

Características principales:

Clase: 1 en alcances de corriente continua y 1,5 en alcances de corriente alterna senoidal.

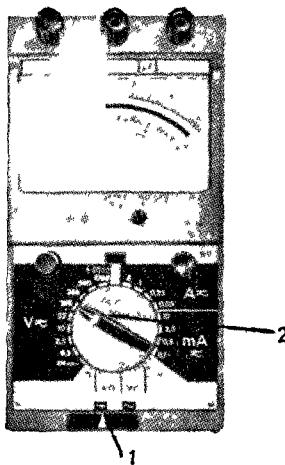


Figura IV-32.

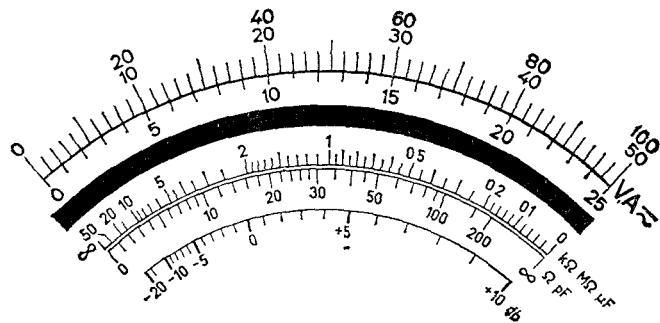


Figura IV-33.

Tensión de prueba de aislamiento: 5 kV. Peso total: 1,6 kg.
Alcances:

- en corriente continua: 0,1 mA; 0,5 mA; 2,5 mA; 10 mA; 50 mA; 250 mA; 1,0 A; 5,0 A; 0,1 - 0,5 - 2,5 - 10 - 25 - 100 - 250 - 500 - 1.000 - 5.000 V;
- en corriente alterna: 0,5 mA; 2,5 mA; 10 mA; 50 mA; 250 mA; 1,0 A; 5,0 A; 0,5 - 2,5 - 10 - 50 - 100 - 250 - 1.000 - 5.000 V;
- mediciones de resistencias: 1 Ω a 50 MΩ en 5 alcances.

Instrumentos magnetoeléctricos con termoelemento. (Termoeléctricos)

El instrumento termoeléctrico consiste en un transductor termoeléctrico y un milivoltímetro magnetoeléctrico cuya escala está graduada en unidades correspondientes a la magnitud medida. El transductor termoeléctrico se compone de un calentador eléctrico a resistencia y de un termoelemento. La corriente a medir circula por el calentador y transmite el calor producido al punto de unión de dos metales que forman el termoelemento. El incremento de la temperatura Δt producido en el calentador por la corriente que circula depende de la potencia disipada P , la cual es función de la intensidad de corriente al cuadrado (ley de Joule)

$$\Delta t = f_1(P) = f_2(I^2)$$

La fuerza electromotriz generada en el termoelemento E_t (fuerza termoeléctrica), depende de la diferencia de temperaturas que existe entre el punto de unión de los dos metales del termoelemento y sus extremos libres. Resumiendo: la fuerza electromotriz depende del aumento de temperatura Δt sobre la temperatura de ambiente, es decir, de la intensidad de corriente al cuadrado

$$E_t = f_3(\Delta t) = f_4(I^2)$$

El circuito interno del instrumento termoeléctrico está compuesto por el termoelemento y por el sistema magnetoeléctrico. Ambos representan una resistencia total del conjunto R por la cual circula la corriente I_t .

$$I_t = \frac{E_t}{R} = \frac{1}{R} \cdot f_4(I^2) = f_5(I^2)$$

Esta corriente I_t produce un momento motor M_m que actúa sobre la parte móvil del sistema magnetoeléctrico y el efecto de este momento motor es una desviación α de la aguja indicadora; $\alpha = C \cdot I_t = C \cdot f_5(I^2) = f(I^2)$ donde C es la constante. Como se ve, la desviación de la aguja es la función de la corriente que circula por el calentador, o sea, de la corriente que se mide. De esto surge que la escala de este tipo de instrumentos tendrá características de escala cuadrática. La figura IV-34 muestra la escala de un voltímetro termoeléctrico de la firma Täuber, Suiza, y la figura IV-35 la de un miliamperímetro de la firma Simpson, USA.

El instrumento termoeléctrico sirve para mediciones de corriente

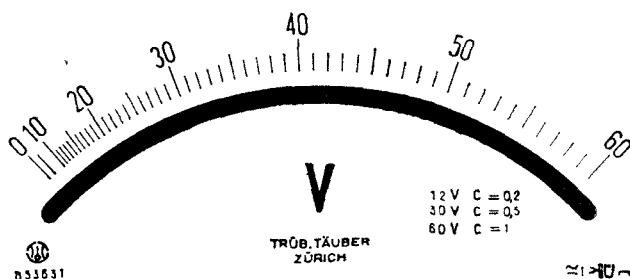


Figura IV-34.

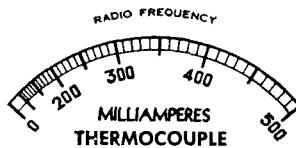


Figura IV-35.

continua o alterna indistintamente. Al utilizarlo en mediciones de corriente alterna indicará valores correspondientes a valores eficaces de la corriente. El instrumento se presta, especialmente, para mediciones de corriente alterna de altas frecuencias.

CONSTRUCCIÓN DE TRANSDUCTORES TERMOELÉCTRICOS

El termoelemento o termopila es una pila en la cual la modificación de la temperatura produce la generación de una fuerza electromotriz denominada fuerza termoeléctrica. La termopila está compuesta por dos metales conductores diferentes, unidos por uno de sus extremos. Cuando el punto de unión de estos conductores se somete a calentamiento (o a enfriamiento) aparece la fem (fte) debido a un efecto Seebeck (descubierto en el año 1841). La exposición de la teoría de este efecto no viene al caso para los fines de este manual; será suficiente saber que la fte generada depende de la combinación de dos metales utilizados para el par y de la diferencia de temperaturas entre el punto de unión y los extremos libres de los dos conductores. Los materiales que se utilizan para la confección de las pilas termoeléctricas (termopares) se caracterizan por una constante que determina la diferencia de potenciales que genere el material con un metal elegido como base. Esta constante α se expresa en $\mu\text{V}/1^\circ\text{C}$ (microvol-

tios por un grado centígrado de diferencia de temperaturas) empleando el constantan como metal de uno de los electrodos. En la tabla adjunta se ve el ordenamiento de los materiales en combinación con el constantan según la diferencia de potenciales que den con él.

MATERIAL	CONSTANTAN	Pt	Hg	Al	Sn	$\frac{90\% \text{ Pt}}{10\% \text{ Rh}}$	Zn	Cu	BRONCE	$\frac{90\% \text{ Pt}}{10\% \text{ Ir}}$	Fe	NICROM	Si
α en $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$	0	35	35,4	39	39,3	40,4	42	42, ^b	46	47	53	50 60	482

Para la confección de termoelementos que se utilizan con los instrumentos termoeléctricos, se elige metales que tengan una apreciable diferencia entre valores de las constantes α , y que además resistan altas temperaturas (sobrecargas). Las combinaciones más frecuentemente empleadas son las siguientes:

Hierro - Constantan	$\text{fte} = 53 - 0 = 53 \mu\text{V}/1^{\circ}\text{C}$
Nicrom - Constantan	$\text{fte} = 50 \text{ a } 60 - 0 = 50 \text{ a } 60 \mu\text{V}/1^{\circ}\text{C}$.
Platinorodio - Platino	$\text{fte} = 40,4 - 35 = 5,4 \mu\text{V}/1^{\circ}\text{C}$
Platinoiridio - Platino	$\text{fte} = 47 - 35 = 12 \mu\text{V}/1^{\circ}\text{C}$.

En el instrumento termoeléctrico el termoelemento está montado en conjunto con un calentador por el cual circula la corriente medida. El termopar y el calentador en conjunto constituyen el transductor o convertidor termoeléctrico.

Existen dos sistemas de calentamiento del punto de unión (5) del termoelemento: *a)* directo y *b)* indirecto. La figura IV-36 muestra algunas variantes del transductor termoeléctrico. En la figura IV-36 a se ve un convertidor termoeléctrico, de calentamiento direc-

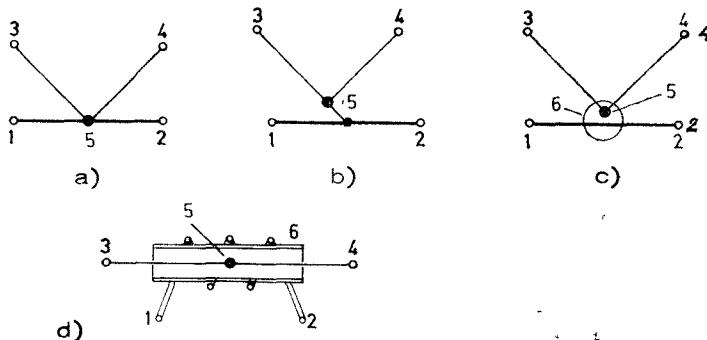


Figura IV-36.

to, en el cual los extremos de alambres del termopar (3-4) están soldados en el punto (5) del alambre del calentador (terminales 1-2). Este sistema trae inconvenientes durante su producción, debido a las diferentes temperaturas de fusión de tres metales unidos en un punto (5) de soldadura. Este inconveniente se soluciona (Hartmann & Braun) separando el punto de unión (5) del termopar del alambre calentador, figura IV-36 b. En este caso, en cada punto de soldadura se sueldan solamente dos metales diferentes.

Para la separación galvánica del termoelemento del calentador se utiliza el calentamiento indirecto. En instrumentos por los cuales circulan corrientes de intensidades pequeñas (voltímetros y miliamperímetros), el convertidor consiste en una pequeña ampolla de vidrio o cuarzo (6 en la fig. IV-36 c), en la cual, en condiciones al vacío, se hallan la punta de unión (5) del termopar y una fracción del alambre calentador, separados entre sí. Este tipo de convertidor ocupa muy poco espacio y debido al vacío en la ampolla no transmite calor al interior del instrumento, siendo por tanto posible su ubicación dentro de la caja del mismo.

Los amperímetros por los cuales circulan intensidades de valor considerable, se conectan al transductor separado del instrumento. Este tipo de convertidor termoeléctrico consiste en un tubo de vidrio o cuarzo (6), véase figura IV-36 d, sobre el cual está bobinado el alambre calentador provisto de terminales 1 y 2. Dentro del tubo de vidrio está colocado el termoelemento (punto de unión 5 y terminales 3 y 4). El sistema permite emplear temperaturas elevadas de calentamiento del termoelemento y, en consecuencia, obtener las fuerzas termoeléctricas de valores altos. La figura IV-37 muestra la vista exterior de un transductor de este tipo fabricado por Simpson (USA).

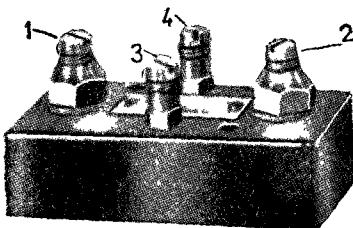


Figura IV-37.

Los instrumentos termoeléctricos se utilizan, generalmente, como amperímetros, miliamperímetros y voltímetros de tablero o portátiles. Su uso más frecuente es en el campo de las corrientes alternas de altas frecuencias.

La figura IV-38 muestra el sistema utilizado en amperímetros y miliamperímetros donde la totalidad de la corriente medida circula a través del calentador del convertidor termoeléctrico. Para cambiar el alcance del amperímetro es conveniente que el instrumento esté provisto de un selector (S), que permite pasar el sistema indicador de un transductor a otro correspondiente al alcance deseado (figura IV-39) con lo cual, lógicamente, las lecturas se efectúan en la escala que corresponde al alcance seleccionado. Como es sabido, las divisiones de la escala del instrumento termoeléctrico dependen del cuadrado de la corriente que circule por el calentador.

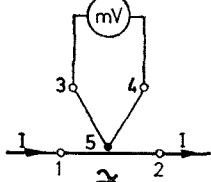


Figura IV-38.

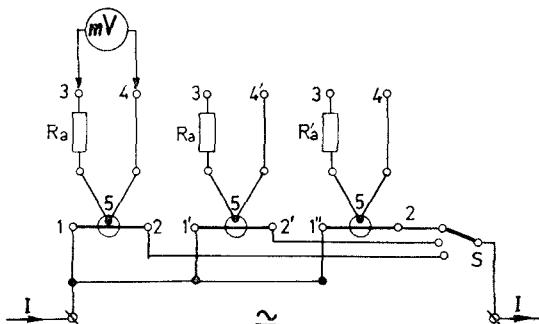


Figura IV-39.

Los voltímetros termoeléctricos se conectan según el esquema de la figura IV-40, donde la resistencia adicional R_a está conectada en serie con el calentador. La resistencia adicional puede ser dividida en dos mitades y conectada según la figura IV-40 b, formando un circuito denominado "simétrico", o conectarse en su totalidad en serie con el calentador en un circuito "asimétrico". Los voltímetros ter-

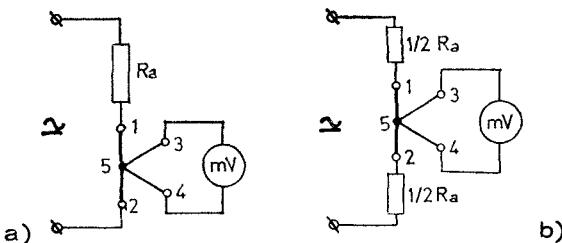


Figura IV-40

moeléctricos se fabrican para medir tensiones de valores comprendidos entre 1 y 1.000 V.

La mayor ventaja de los instrumentos termoeléctricos es la posibilidad de utilizarlos en mediciones precisas en corriente alterna, habiéndolos previamente contrastado con corriente continua.

Instrumentos magnetoeléctricos diferenciales. Logómetros

El logómetro o instrumento diferencial está construido en base al sistema magnetoeléctrico modificado. La diferencia entre un sistema magnetoeléctrico común y el logómetro consiste en que en este último la parte móvil está formada por dos bobinas móviles I y II, figura IV-41, en lugar de una, unidas rígidamente. Este conjunto de bobi-

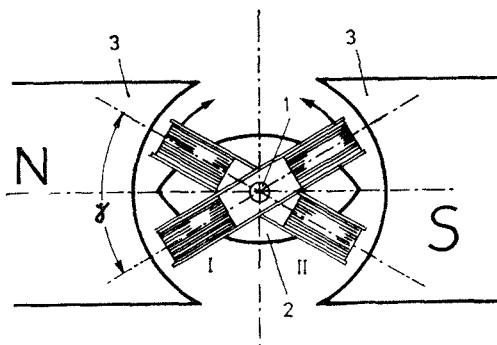


Figura IV-41.

nas actúa sobre el mismo eje (1), al cual está fijada la aguja indicadora. El entrehierro formado entre el núcleo central (2) y los polos del imán (3), en el cual se mueven las dos bobinas, no es uniforme, sino que varía gradualmente y, en consecuencia, la inducción magnética B varía también a lo largo del entrehierro. Las dos bobinas están conectadas entre sí en oposición, de manera que los momentos motor producidos por cada una de las bobinas actúan en sentido contrario. La conexión eléctrica de las bobinas móviles con la parte fija del sistema es de cintas muy blandas de plata u oro, lo cual elimina el momento antagonista y, en consecuencia, en estado sin corriente, la parte móvil con la aguja indicadora se detiene en una posición cualquiera.

Al circular la corriente por las bobinas, la parte móvil del logómetro tiende a ubicarse en la posición en la cual la suma de ambos

momentos (de las dos bobinas) es igual a cero. De todo esto surge que sobre la parte móvil actúan dos momentos motor contrarios

$$M = M_1 + (-M_2) = 0 \text{ de donde } M_1 = M_2$$

El momento motor de la bobina móvil del sistema magnetoeléctrico se expresa:

$$M_m = B \cdot I \cdot S \cdot n \text{ o también } M_m = B \cdot I \cdot C \cdot n$$

donde

B es la inducción magnética en el entrehierro

n es el número de espiras de la bobina móvil

C es la constante que depende de las dimensiones de la bobina ($S = b \cdot a$).

En el sistema diferencial existen dos bobinas ubicadas en el entrehierro: la bobina I (fig. IV-41), cuyos lados tienden a colocarse en la parte del entrehierro de la inducción B_1 , y la bobina II, cuyos lados tienden a colocarse en la parte de la inducción B_2 .

La bobina I originará un momento motor $M_1 = C_1 \cdot B_1 \cdot I_1 \cdot n_1$ y la bobina II originará un momento motor $M_2 = C_2 \cdot B_2 \cdot I_2 \cdot n_2$. Para que se cumpla la condición de equilibrio ($M_1 = M_2$), la bobina de más amperiovueltas debe hallarse en el lugar de la inducción magnética menor y la bobina de menos amperiovueltas en el lugar de la inducción magnética mayor. Para conseguirlo se utilizan varias formas de polos del imán y del núcleo central, diseñadas de modo que la inducción magnética varía según la relación funcional

$$B = f(\alpha)$$

donde α es el ángulo de desviación de la primera bobina.

Cuando está cumplida esta relación funcional, se pueden expresar ambos momentos en función del ángulo de desviación de la parte móvil

$$\begin{aligned} M_1 &= C_1 \cdot I_1 \cdot n_1 \cdot f(\alpha) \quad \text{y} \\ M_2 &= C_2 \cdot I_2 \cdot n_2 \cdot f(\alpha + \gamma) \quad \text{donde} \end{aligned}$$

γ es el ángulo entre las bobinas I y II. La figura IV-42 muestra algunas de las formas de entrehierro utilizadas para obtener la relación funcional deseada. En la figura IV-43 se aprecia el sistema utilizado por la firma Hartman & Braun en la construcción del instrumento diferencial.

En el estado de equilibrio cuando $M_1 = M_2$, o sea, cuando

$$C_1 \cdot I_1 \cdot n_1 \cdot f(\alpha) = C_2 \cdot I_2 \cdot n_2 \cdot f(\alpha + \gamma)$$

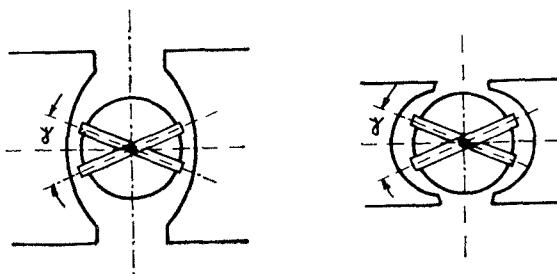
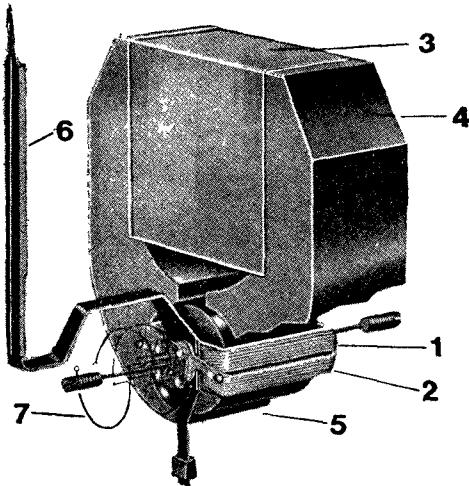


Figura IV-42.

Figura IV-43.

- 1 — bobina móvil I
- 2 — bobina móvil II
- 3 — imán permanente
- 4 — extensión polar
- 5 — núcleo central
- 6 — aguja indicadora
- 7 — conexión flexible



la parte móvil se detiene en una posición determinada, en la cual la relación entre las corrientes de las bobinas será:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{C_2 \cdot n_2 \cdot f(\alpha + \gamma)}{C_1 \cdot n_1 \cdot f(\alpha)} = C \cdot F(\alpha)$$

Se deduce que el ángulo de desviación de la parte móvil depende de la relación entre las corrientes de las bobinas. El cambio de la posición de la parte móvil se obtiene de dos maneras: a) cambiando simultáneamente las corrientes en ambas bobinas, o b) cambiando la corriente en una bobina únicamente. El primer sistema se utiliza cuando

ambas corrientes dependen de la magnitud medida y, el segundo, cuando solamente una corriente depende de la magnitud medida.

Existen varias aplicaciones del sistema diferencial en el campo de instrumentos de medición, de las cuales se mencionarán a continuación las más utilizadas.

Instrumento portátil, que se utiliza para mediciones de resistencias de aislamiento de cables de la red, de devanados de máquinas y aparatos, etc.; se denomina megómetro o "Megger", nombre tomado del primer instrumento de este tipo fabricado en Inglaterra. El megómetro diferencial está provisto de una fuente interna de corriente continua, que consiste en un generador de c.c. o un alternador con un sistema rectificador. Este generador accionado a mano está provisto de un regulador mecánico que permite mantener constantes las revoluciones. La razón de utilizar la fuente de corriente continua son las respectivas normas que exigen mediciones de resistencia de aislamiento con la corriente continua. Los valores de tensiones que generan estos generadores o alternadores oscilan, según la marca y finalidad, entre los 250 y 5.000 V. La figura IV-44 muestra el esquema de un megómetro de este tipo.

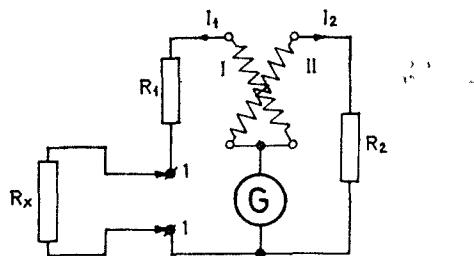


Figura IV-44.

La resistencia a medir R_x (p. e., de aislamiento) se conecta a los bornes (1), y de este modo queda conectada en serie con la resistencia R_1 y con la resistencia R_I de la bobina móvil I. En serie con la bobina móvil II (resistencia R_{II}) está conectada la resistencia R_2 . El generador (G) actúa como fuente.

La corriente I_1 en el circuito de la bobina I, es

$$I_1 = \frac{U}{R_x + R_1 + R_I}$$

donde U es la tensión del generador y R_I la resistencia de la bobina I.

La corriente I_2 en el circuito de la bobina II, es

$$I_2 = \frac{U}{R_2 + R_{II}}$$

donde R_{II} es la resistencia de la bobina II.

La relación entre las corrientes en las bobinas es:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\frac{U}{R_x + R_1 + R_I}}{\frac{U}{R_2 + R_{II}}} = \frac{R_2 + R_{II}}{R_x + R_1 + R_I}$$

$$\frac{R_2 + R_{II}}{R_2 + R_{II}}$$

La desviación de la parte móvil es función de esta relación:

$$\alpha = C \cdot f \left(\frac{I_1}{I_2} \right) = C \cdot f \left(\frac{R_2 + R_{II}}{R_x + R_1 + R_I} \right)$$

Las resistencias R_1 , R_2 , R_I y R_{II} son constantes y, en consecuencia, la desviación α depende solamente de la resistencia R_x

$$\alpha = C_1 \cdot f_1(R_x)$$

La desviación de la parte móvil depende del valor de la resistencia que se mide; la escala del instrumento puede ser graduada directamente en $M\Omega$.

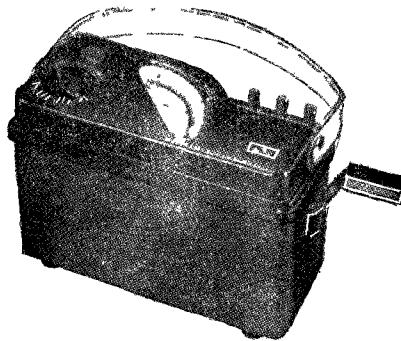


Figura IV-45.

Un megóhmímetro de este tipo, fabricado por Hartman & Braun (figura IV-45) sirve para dos alcances de medición: uno, en que, al emplearse una tensión de 2.500 V proveniente de la fuente, comprendería

valores de medición entre 0 y $1000\text{ M}\Omega$, y el otro, para lo cual se utiliza la tensión de alimentación de 5000 V y que permite medir resistencias de aislamiento comprendidas entre 48 y 4.000 $\text{M}\Omega$. En la figura IV-46 se puede apreciar el facsímil de su escala.

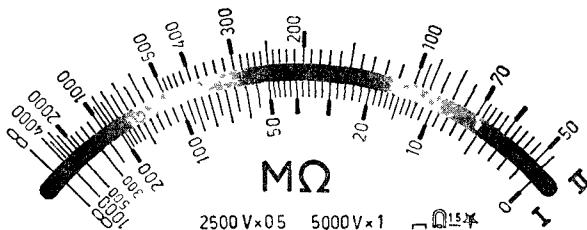


Figura IV-46.

Los instrumentos diferenciales tienen muchas aplicaciones en el campo de mediciones de magnitudes no eléctricas valiéndose para ello de sistemas de mediciones eléctricas.

Para medir la cantidad de combustible en un automóvil se utiliza un instrumento que mide la cantidad de líquido contenido en su tanque. La figura IV-47 muestra el esquema. El transductor consiste

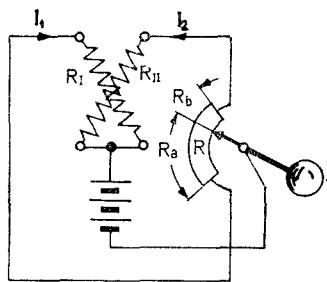


Figura IV-47.

en una resistencia variable (R) provista de un cursor accionado mediante el flotador (1), ubicado dentro del tanque de combustible. El instrumento está alimentado por la batería (E). La posición del cursor varía con la posición del flotador (1), al cual está fijado; éste, a su vez, varía su posición según el nivel del combustible en el tanque. Al deslizarse el cursor sobre la resistencia variable (R), varía la relación entre las resistencias parciales R_a y R_b .

La intensidad de corriente I_1 que circula por la bobina I del instrumento es

$$I_1 = \frac{E}{R_I - R_a}$$

y la intensidad de corriente I_2 que circula por la bobina II es

$$I_2 = \frac{E}{R_{II} - R_b}$$

La relación entre las dos corrientes se expresa por

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\frac{E}{R_I - R_a}}{\frac{E}{R_{II} - R_b}} = \frac{R_{II} - R_b}{R_I - R_a}$$

Como ya se ha mencionado, la desviación del instrumento es función de esta relación y ésta, a su vez, depende de la cantidad del líquido en el tanque. La escala es graduada en porcentaje de la capacidad del tanque.

La figura IV-48 muestra el esquema de un termómetro eléctrico. Según este esquema, varía únicamente una de las corrientes en el

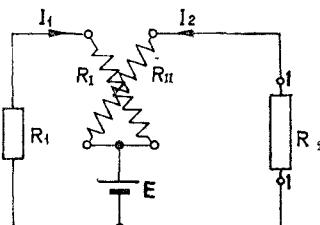


Figura IV-48.

instrumento. La variación se produce debido a la modificación del valor de la resistencia R_2 . La resistencia R_2 está confeccionada de material que, bajo variaciones de temperatura, varía considerablemente su resistencia específica. Al variar la resistencia R_2 , varía la intensidad de corriente I_2 , mientras la corriente I_1 en la bobina I permanece constante. Esto origina un cambio de relación entre las corrientes y, en consecuencia, la parte móvil se desvía. La escala está graduada directamente en grados centígrados.

Instrumentos magnetoeléctricos de imán móvil

El sistema magnetoeléctrico de imán móvil es de uso restringido, ya que ha sido suplantado por el sistema de bobina móvil. Sin embargo, debido a su bajo costo, resulta conveniente su empleo en la construcción de algunos tipos de galvanómetros, amperímetros de automóvil e instrumentos de tablero.

El sistema de imán móvil funciona según el mismo principio que el sistema de bobina móvil: la desviación de la parte móvil se produce debido a la acción recíproca de dos campos magnéticos: uno, de imán permanente (parte móvil), y el otro, de la bobina (parte fija). La figura IV-49 ilustra su funcionamiento. El imán móvil (1) está ubi-

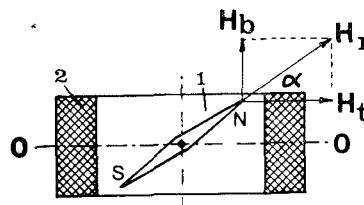


Figura IV-49.

cado en el interior de la bobina fija (2). En estado de reposo (la bobina sin corriente) el imán móvil (1) toma una posición acorde con el sentido del campo magnético terrestre H_t (eje 0-0'). Al circular la corriente por la bobina se crea en la misma un campo magnético H_b y el imán móvil tomará la posición acorde con la resultante H_r de ambos campos. Se puede determinar la desviación de la parte móvil por la tangente del ángulo de desviación

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H_b}{H_t}$$

Asumiendo que el campo magnético terrestre H_t es constante y que el campo H_b de la bobina es proporcional a la corriente que circula por ella, se puede expresar la tangente

$$\operatorname{tg} \alpha = C \cdot I \text{ y en consecuencia } \alpha = f(I)$$

La desviación de la parte móvil depende de la corriente que circula por la bobina. De estas consideraciones surge que el principal incon-

veniente del sistema simple de imán móvil es la gran influencia del campo magnético terrestre a sus indicaciones.

MOMENTO MOTOR

Una de las maneras de deducir la fórmula de momento motor es partiendo del equilibrio energético. La energía consumida por el sistema se compone de la energía utilizada para la desviación de la parte móvil ($Md\alpha$) y de la energía disipada en el arrollamiento (I^2Rdt).

$$U \cdot Idt = Md\alpha + I^2Rdt$$

También en un circuito, según la 2.^a Ley de Kirchhoff, tenemos que $U + E = I \cdot R$, donde E es la fuerza electromotriz inducida en la bobina de n espiras, durante la variación del flujo magnético relacionado con el arrollamiento

$$E = -n \frac{d\phi}{dt}$$

El flujo magnético ϕ relacionado con la bobina se compone del flujo ϕ_b producido por la corriente que circula por el arrollamiento y de la componente del flujo del imán $\phi_i \operatorname{sen} \alpha$ que coincide con el eje de la bobina

$$\phi = \phi_b + \phi_i \operatorname{sen} \alpha$$

El flujo ϕ_i de la bobina es constante cuando $I = \text{const}$. La componente $\phi_i \operatorname{sen} \alpha$ varía con la posición del imán móvil. Sustituyendo en la fórmula de la fem inducida el flujo, se obtiene

$$E = -n \frac{d\phi}{dt} = -n \frac{d(\phi_b + \phi_i \operatorname{sen} \alpha)}{dt} = -n \phi_i \cos \alpha \frac{d\alpha}{dt}$$

Sustituyendo E en la ecuación $U + E = I \cdot R$ tenemos

$$U = I \cdot R - E = I \cdot R + n \cdot \phi_i \cos \alpha \frac{d\alpha}{dt}$$

La totalidad de la energía suministrada al sistema será:

$$\begin{aligned} U \cdot Idt &= \left(I \cdot R + n \phi_i \cos \alpha \frac{d\alpha}{dt} \right) Idt = \\ &= I^2Rdt + n \phi_i \cos \alpha \cdot Id\alpha = Md\alpha + I^2Rdt \end{aligned}$$

$$Md\alpha = I \cdot n \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha \quad \text{y} \quad M = I \cdot n \cdot \phi_i \cos \alpha = C \cdot I \cdot \cos \alpha$$

donde $C = n \cdot \phi_i = \text{const}$.

La función $M = f(\alpha)$ es sinusoidal y la escala no es uniforme.

AMPERÍMETROS Y VOLTÍMETROS

El sistema de imán móvil, originariamente, era muy sensible a la influencia del campo magnético terrestre y otros campos exteriores. Para emplearlo como instrumento de uso común se utiliza el sistema modificado por Ayrton (1880). La modificación consiste en la colocación del conjunto (fig. IV-50), imán móvil (1) y bobina (2) en un

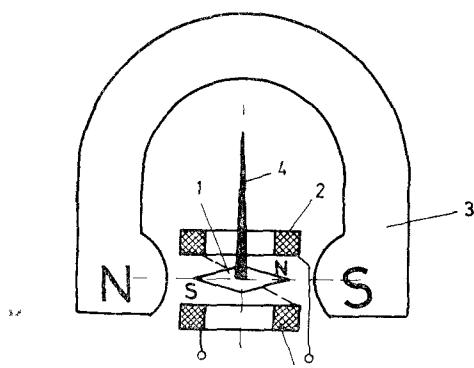


Figura IV-50.

campo magnético de un imán fijo (3), lo que prácticamente compensa la influencia del campo magnético terrestre. Además de esta compensación, los dos imanes, móvil (2) y fijo (3), crean por acción recíproca un momento antagonista, lo que permite prescindir de las espirales antagonistas.

Un ejemplo de aplicación del sistema Ayrton es el amperímetro del automóvil (Ford). Observando la figura IV-51 se aprecia la gran similitud del sistema original de Ayrton (fig. IV-50), con este tipo de amperímetro. En ambos instrumentos tenemos el imán móvil (1), al cual está fijada la aguja indicadora (4), colocado en el campo del imán fijo (3). La diferencia consiste en que el amperímetro de automóvil carece de bobina. La bobina fija está sustituida por un trozo (2) del conductor de la instalación eléctrica intercalado en el circuito de carga. Este conductor, al haber sido fijado a la caja del instrumento mediante una abrazadera (5) de hierro no remanente, crea un campo magnético proporcional a la corriente de carga (C) o de descarga (D) en el circuito.

En la figura IV-52 se puede apreciar otro sistema de compensa-

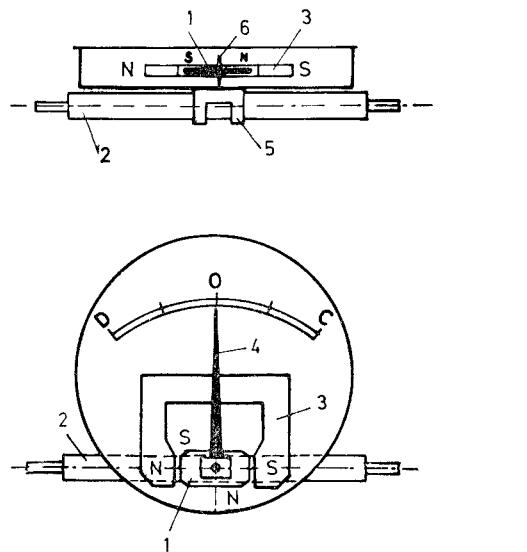


Figura IV-51.

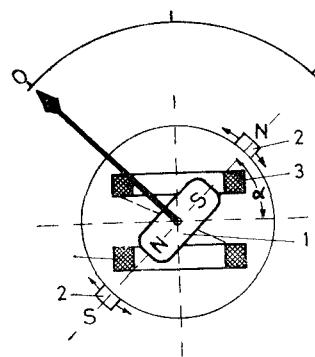


Figura IV-52.

ción del campo magnético terrestre. Antes de utilizar el instrumento se coloca el imán móvil (1) en tal posición que la aguja indicadora acuse cero de la escala. Este alineamiento se efectúa utilizando dos imanes de control (2), los cuales mediante un tornillo micrométrico permiten su desplazamiento en ambos sentidos.

El tipo de escala del instrumento de imán móvil depende de la posición inicial del imán con respecto a la bobina. Esta posición está determinada por el ángulo α . Se consigue una escala uniforme cuando la sensibilidad del sistema es constante

$$S = \frac{d\alpha}{dI} = \text{const.}$$

La escala (casi perfectamente) uniforme se obtiene cuando $\alpha_0 = 40^\circ$.

El sistema de imán móvil se utiliza para la construcción de instrumentos de tablero de pequeños tamaños en clases 1,5 y 2,5. La potencia que consume un instrumento de este tipo es inferior a 0,1 mW. El alcance mínimo de amperímetros directos es 0-400 mA. Para alcances mayores se utilizan resistencias calibradas (shunt) con una caída de tensión de 60 a 150 mV. Para emplear este sistema en calidad de voltímetro se utilizan las resistencias adicionales. El alcance mínimo del voltímetro es del orden de 0-4 V.

La influencia de campos magnéticos externos es muy grande, provocando errores adicionales de lectura, que pueden llegar hasta un 10 por 100. Como medida de protección contra la influencia de estos campos exteriores se protege el sistema con un blindaje magnético. Si bien esta medida es efectiva como protección contra influencias magnéticas exteriores, conlleva otro problema: debido al efecto de histéresis del material empleado para el blindaje, aparecen diferencias entre las lecturas efectuadas con las corrientes ascendentes y las lecturas efectuadas con las corrientes descendentes.

LOGÓMETROS DE IMÁN MÓVIL

El sistema de imán móvil se presta especialmente para la construcción de logómetros debido a la relativamente pequeña masa de su parte móvil. La figura IV-53 muestra el principio. La parte móvil

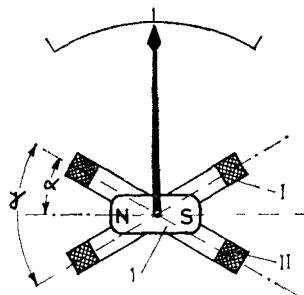


Figura IV-53.

constituida por el imán (1) se sitúa en la posición que coincide con el flujo magnético resultante de los flujos de dos bobinas I y II. El momento motor originado por el campo magnético de la bobina I es

$$M_{m1} = c_1 \cdot I_1 \cdot \cos \alpha$$

donde

I_1 es la corriente en la bobina I

α es el ángulo entre los ejes del imán y de la bobina I.

El momento motor producido por el campo magnético de la bobina II es

$$M_{m2} = c_2 \cdot I_2 \cdot \cos (\gamma - \alpha)$$

donde

I_2 es la corriente en la bobina II

γ es el ángulo entre ejes de dos bobinas.

Los momentos M_{m1} y M_{m2} actúan en sentido opuesto y en el estado de equilibrio los dos momentos son iguales

$$M_{m1} = M_{m2}$$

$$c_1 \cdot I_1 \cdot \cos \alpha = c_2 \cdot I_2 \cdot \cos (\gamma - \alpha) \quad ; \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{c_2 \cdot \cos (\gamma - \alpha)}{c_1 \cdot \cos \alpha} = f(\alpha)$$

$$\alpha = F \left(\frac{I_1}{I_2} \right)$$

La desviación de la parte móvil depende de la relación entre corrientes en las bobinas.

Capítulo V

INSTRUMENTOS ELECTROMAGNETICOS

El principio de funcionamiento del instrumento electromagnético, denominado también “de hierro móvil”, se basa en la atracción que ejerce un campo magnético, creado por la bobina por la cual circula la corriente que se mide, sobre la parte móvil. La parte móvil está confeccionada de material magnético no remanente. El núcleo móvil tiende a asumir una posición que originará el incremento del flujo magnético de la bobina. Este incremento se debe a que el núcleo al entrar en la bobina disminuye la resistencia magnética del conjunto (bobina y núcleo). El flujo magnético de la bobina incrementa a pesar que la intensidad de la corriente permanece invariable. El incremento del flujo magnético significa el aumento de la energía magnética A_{μ} .

$$A_{\mu} = \frac{\phi \cdot I}{2}$$

La aguja indicadora está fijada al núcleo móvil. El instrumento funciona tanto con la corriente continua como con la alterna, pues en ambos casos el circuito eléctrico, debido a su inductividad, tiende a aumentar su energía magnética a costa de la energía eléctrica absorbida del exterior.

La fuerza de atracción que ejerce la bobina sobre el núcleo móvil depende de la energía que consume el instrumento, o sea, de la corriente que circula por la misma. La desviación de la aguja indicadora fijada al núcleo móvil está en función de la corriente que circula. El sistema se puede utilizar como voltímetro o como amperímetro. Esto depende de las características de la bobina (número de espiras y resistencia eléctrica), y de su forma de conexión en el circuito.

El principio de funcionamiento de un instrumento electromagnético puede verse en la figura V-1. Dentro de la bobina fija (1) se desplaza el núcleo (2) suspendido sobre un resorte (3). La aguja indicadora (4) fijada al núcleo se desplaza a lo largo de la escala (5). De esta manera el resorte (3) origina el momento antagonista M_a contrario al momento motor M_m .

Basado en este principio se utilizan dos variantes del sistema electromagnético: 1) mononúcleo o de atracción y 2) polinúcleo o de repulsión.

En la figura V-2 se puede apreciar el funcionamiento del sistema mononúcleo. El núcleo (1) de chapa magnética y de forma ovalada o

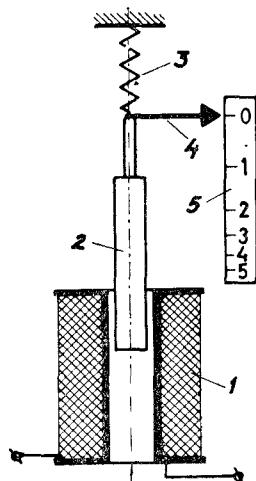


Figura V-1.

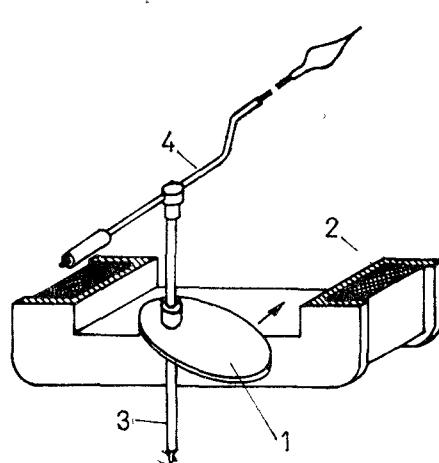


Figura V-2.

redonda excéntrica, está fijado sobre el eje (3). Una espiral, que no figura en el croquis, origina el momento antagonista. El campo magnético de la bobina (2) (figura en corte), atrae el disco hacia el interior de la bobina produciendo el movimiento giratorio del eje y desplazamiento de la aguja (4) sobre una correspondiente escala.

Las figuras V-3 y V-4 muestran dos variantes del sistema de dos núcleos, uno fijo y el otro móvil. En la construcción representada en la figura V-3, los dos núcleos tienen forma de láminas rectangulares y en la figura V-4, los dos núcleos, fijo (2) y móvil (3) tienen forma de chapas semicirculares. Al circular la corriente a través de la bobina (1) se produce en el interior de ella un campo magnético cuya

intensidad está en función de las amperiovoltas de la bobina. Estas dependen de la corriente que circula, la cual se mide. Ambos núcleos, fijo y móvil, se imantan con polaridades iguales y, en consecuencia, se produce una fuerza de repulsión entre ellos haciendo girar el núcleo móvil sobre su eje. El movimiento del eje hace desplazar la aguja indicadora a lo largo de la escala. El momento antagonista se origina de manera usual en una espiral que no aparece en la figura.

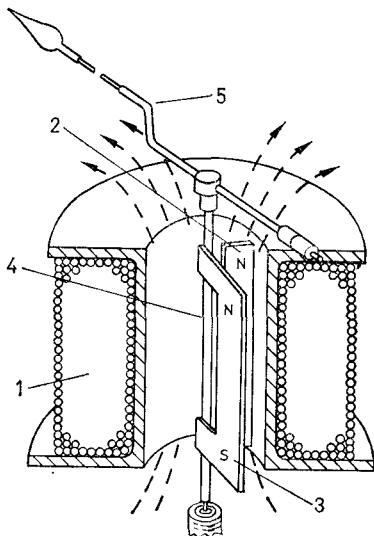


Figura V-3.

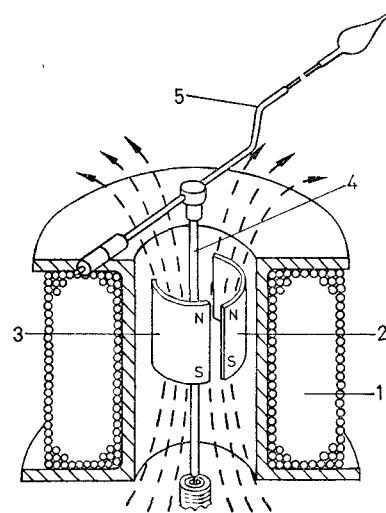


Figura V-4.

La figura V-5 muestra el sistema de 4 núcleos: dos fijos (2-2') y dos móviles (3-3'). Los 4 núcleos presentan la ventaja de obtener un momento motor mayor que el de dos núcleos, con la misma cantidad de energía. Por esta razón se utiliza este sistema en instrumentos de precisión. En la figura V-6 se puede apreciar los detalles de construcción de un instrumento de dos núcleos, fabricado por la firma Hartmann & Braun. Las partes principales son las siguientes: 1) núcleo fijo ubicado dentro del carrete de la bobina; 2) núcleo móvil fijado sobre el eje; 3) bobina; 4) espiral antagonista; 5) aguja indicadora; 6) corrector de cero, y 7) aleta del amortiguador.

Los instrumentos electromagnéticos se fabrican en casi todas las clases de exactitud. Por ser insensibles a la polaridad funcionan con la corriente continua y la corriente alterna indistintamente. Sin em-

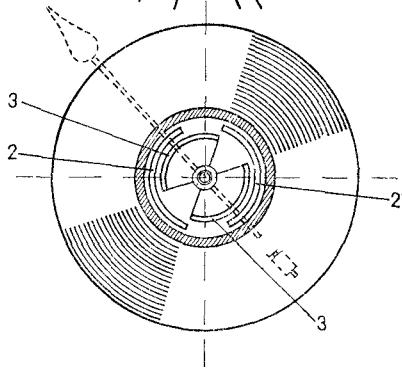
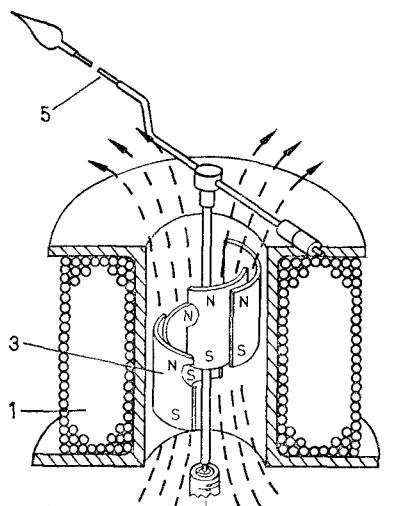


Figura V-5.

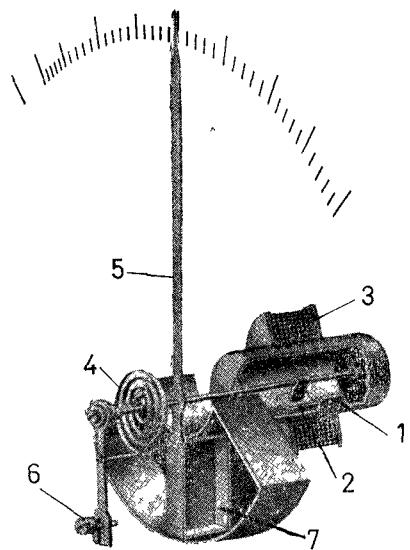


Figura V-6.

bargo, debido a que su funcionamiento depende de la magnetización del núcleo ferromagnético y a ésta influye el ciclo de histéresis del material del núcleo, se presentan inconvenientes en mediciones de corriente continua. Los inconvenientes se deben a las diferencias que aparezcan entre las lecturas que se toman con valores ascendentes y lecturas tomadas con valores descendentes. En consecuencia, el instrumento puede tener dos clases de exactitud diferentes: una en mediciones con corriente continua y la otra en mediciones con corriente alterna. El uso más frecuente del instrumento electromagnético es en calidad de voltímetros y amperímetros de clases de exactitud inferior.

Momento motor y escalas

Al principio de este capítulo se ha mencionado que el sistema indicador tiende a incrementar su energía magnética a costa de la energía suministrada por el circuito. Consideramos un sistema indicador electromagnético en un estado en el cual la aguja indicadora acusa una desviación fija α . En este instante, por la bobina cuya inductancia es L , circula una corriente continua I de valor constante, originando un momento motor M_m . La energía suministrada por el circuito durante el lapso dt será

$$dA = U \cdot I \cdot dt$$

La caída de tensión U se compone de la caída sobre la resistencia activa R de la bobina y de la fem inducida por la variación del flujo $d\phi$ en la misma. La caída de tensión total es

$$U = I \cdot R + \frac{d\phi}{dt}$$

El flujo $\phi = I \cdot L$, es originado por la bobina cuya inductancia L se puede considerar constante cuando no haya variaciones en posición del núcleo móvil dentro de la misma. Esta inductancia aumenta a medida que aumenta la desviación de la parte móvil.

La energía suministrada por el circuito es

$$dA_s = U \cdot I \cdot dt = \left(I \cdot R + \frac{d\phi}{dt} \right) \cdot I \cdot dt$$

siendo

$$\phi = I \cdot L \quad \frac{d\phi}{dt} = I \cdot \frac{dL}{dt}$$

sustituyendo obtenemos:

$$\left(I \cdot R + I \frac{dL}{dt} \right) \cdot Idt = I^2 R dt + I^2 dL$$

Esta ecuación representa la totalidad de energía suministrada al sistema que a la vez está consumida por el mismo. Una parte de esta energía ($I^2 R dt$) se transforma en calor y la desviación de la parte móvil origina el consumo $M_m d\alpha$. Además, debido a la introducción del núcleo en el interior de la bobina, aumenta la energía magnética por $d \frac{LI^2}{2} = \frac{I^2}{2} dL$.

El balance de la energía consumida se puede expresar:

$$dA_c = I^2 R dt + M d\alpha + \frac{I^2}{2} dL$$

La energía suministrada es igual a la energía consumida

$$dA_c = dA_s$$

o sea

$$I^2 \cdot R \cdot dt + M d\alpha + \frac{I^2}{2} dL = I^2 \cdot R \cdot dt + I^2 \cdot dL$$

y de esto

$$M \cdot d\alpha = \frac{I^2 dL}{2}$$

De esta ecuación surge la fórmula que expresa el momento motor del sistema electromagnético

$$M_m = \frac{I^2}{2} \cdot \frac{dL}{d\alpha}$$

La fórmula fue deducida en base a funcionamiento del instrumento con corriente continua. Para la corriente alterna se puede asumir que la fórmula determina el valor instantáneo del momento motor. En este caso la desviación de la parte móvil está en función del valor medio del momento motor

$$M_m = \frac{1}{T} \int_0^T M_m dt$$

(medio)

como $i = I_{max} \operatorname{sen} \omega t$

$$M = \frac{i^2}{2} \frac{dL}{d\alpha} = \frac{(I_{max} \operatorname{sen} \omega t)^2}{2} \frac{dL}{d\alpha}$$

El valor medio del momento motor lo obtenemos integrando el valor instantáneo

$$M_m = \frac{1}{T} \int_0^T M dt = \frac{1}{4} I_{max}^2 \frac{dL}{d\alpha}$$

(medio)

El valor eficaz de la corriente alterna sinusoidal es: $I_{ef} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$

El momento motor medio:

$$M_m = \frac{I^2}{2} \frac{dL}{d\alpha}$$

(medio)

El instrumento calibrado con corriente continua acusará valores eficaces con corriente alterna sinusoidal.

El momento antagonista se origina en la espiral (4) de la figura V-6.

$M_a = m\alpha$ donde m es la constante de elasticidad de la espiral (véase Cap. III).

La aguja indicadora se detiene en una posición que corresponde al estado de equilibrio, o sea, cuando los dos momentos, motor y antagonista, son iguales

$$M_m = M_a$$

$$\frac{I^2}{2} \frac{dL}{d\alpha} = m\alpha$$

$$\alpha = \frac{1}{m} \frac{I^2}{2} \frac{dL}{d\alpha}$$

El ángulo de desviación de la parte móvil depende de dos factores: 1) de la intensidad de corriente al cuadrado, y 2) de la derivada

$\frac{dL}{d\alpha}$. Dependiendo la derivada $\frac{dL}{d\alpha}$ de la forma de núcleo (o núcleos),

se puede conseguir, mediante ensayos con diferentes núcleos, varios tipos de escala con una característica en común: la parte inicial de la escala es una parte "muerta", o sea, no utilizable para efectuar lecturas. Esta parte muerta comprende hasta el 10 % de las divisiones de la escala en instrumentos de clases de exactitud altas (0,2 a 0,5) y hasta el 20 % en instrumentos de tablero (1,5 a 5).

La figura V-7 muestra facsímiles de dos escalas de instrumentos electromagnéticos de clase 0,5: una es de un amperímetro y la segunda de un voltímetro; ambos instrumentos de varios alcances. La figura V-8 muestra tres tipos de escala que fueron aplicados a un mismo sistema motor de un instrumento de tablero, de alcance nominal 0-10 A, utilizando diferentes formas del núcleo móvil. En la figura V-8a se aprecia una escala normal; en la figura V-8b una escala extensa para sobrecarga, y en la figura V-8c una escala muy extensa para unas sobrecargas instantáneas que sobrepasan hasta 5 veces la carga nominal.

El sistema motor electromagnético permite la construcción de voltímetros y amperímetros sencillos y de bajo costo, pero de bajas clases de exactitud (0,5 a 5). Se presta especialmente para instrumentos de tablero.

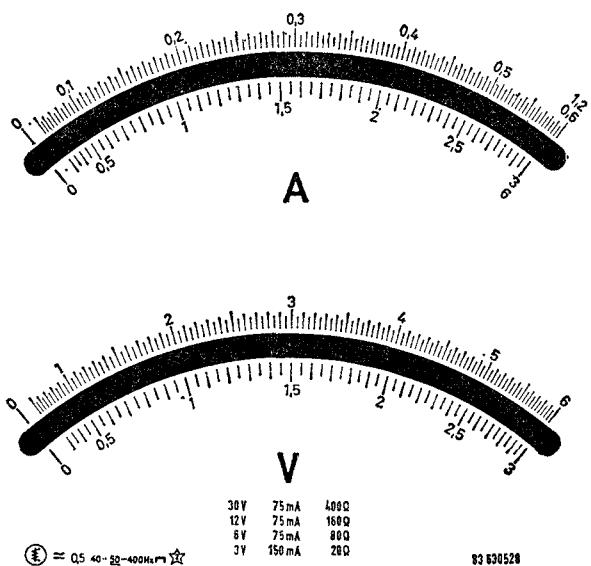


Figura V-7.

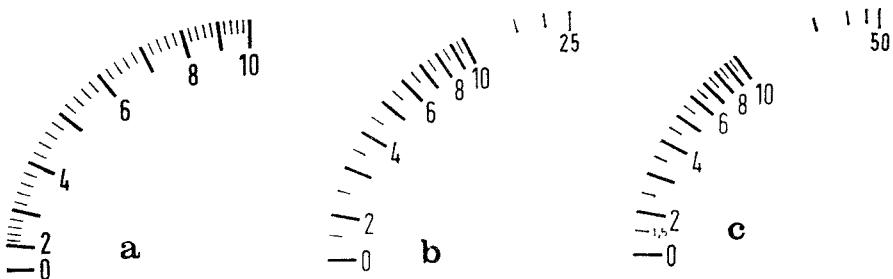


Figura V-8.

Voltímetro electromagnético

El circuito del voltímetro electromagnético (fig. V-9) está compuesto por la bobina fija L_b , R_b del electroimán, y por la resistencia adicional R_a en serie con la bobina. La resistencia adicional está confeccionada con el alambre de constantan o de maganina. El inconveniente del voltímetro electromagnético es su consumo elevado. Para

su funcionamiento (desviación a plena escala) se necesita 2 VA, aproximadamente, sin contar la potencia que disipa la resistencia adicional. Por ejemplo, un voltímetro de alcance 0-10 V consume la intensidad $I_v = 0,5$ A, lo que implica la potencia total absorbida, $10 \text{ V} \cdot 0,5 \text{ A} = 5 \text{ VA}$. De esta potencia (5 VA), 2 VA se consumen en la bobina del electroimán y el resto, o sea, 3 VA se disipan en la resistencia adicional. Debido a la intensidad de corriente relativamente alta, se presentan ciertas dificultades para la disipación de calor en la resistencia adicional. Para facilitar el enfriamiento se coloca frecuentemente la resistencia adicional fuera de la caja del instrumento.

El cambio de alcance en instrumentos portátiles se efectúa de dos maneras; una, con resistencias adicionales escalonadas, similar al de los voltímetros magnetoeléctricos (fig. IV-12), y otra dividiendo la bobina en dos secciones (fig. V-10). Cada una de las secciones (L_1 y L_2)

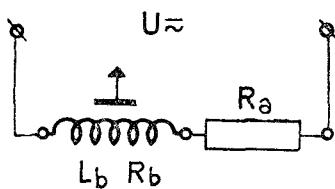


Figura V-9.

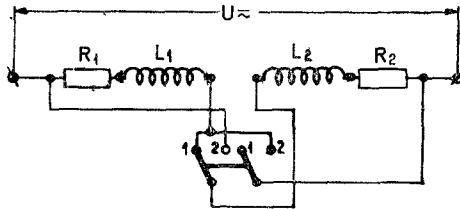


Figura V-10.

está conectada con una resistencia adicional (R_1 y R_2). El selector en la posición 1 permite utilizar un alcance dos veces mayor que cuando está en la posición 2, lo que se puede fácilmente apreciar en la figura. Los voltímetros electromagnéticos se construyen para los alcances no inferiores a 5 V y no mayores a 1.000 V. Para mediciones de tensiones altas de corriente alterna se utilizan voltímetros electromagnéticos en conjunto con transformadores de tensión. En este caso el voltímetro es de alcance de 100 V (tensión secundaria nominal del transformador de tensión) y su escala está graduada de acuerdo con la relación de transformación del transformador (véase 3.^{er} tomo: Potencia y Energía).

Amperímetro electromagnético

El amperímetro electromagnético, como todos los amperímetros, se conecta en serie con el receptor, cuya intensidad se mide de manera que la intensidad que circula por el instrumento depende del receptor. La potencia que requiere el sistema electromagnético del am-

perímetro para su desviación máxima es de 2 VA aproximadamente, igual que en el caso del voltímetro. Para que el sistema absorba esta potencia del circuito es imprescindible que sobre los extremos de la bobina se dé una caída de tensión suficientemente grande.

Ejemplo: El amperímetro de alcance 0-1 A requiere una caída de tensión de 2 V para que su sistema absorba la potencia de 2 VA ($1 \text{ A} \cdot 2 \text{ V} = 2 \text{ VA}$); el amperímetro de alcance 0-10 A requiere la caída de 0,2 V ($10 \text{ A} \cdot 0,2 = 2 \text{ VA}$), y un amperímetro de alcance 0-100 A una caída de tensión de 0,02 V ($100 \text{ A} \cdot 0,02 = 2 \text{ VA}$). Por lo general, los amperiovoltas necesarios para producir la desviación máxima en amperímetros electromagnéticos de clase 1,5 son del orden 300 Av. El número de amperiovoltas influye en la intensidad mínima y máxima del amperímetro. La intensidad mínima está limitada por la caída de tensión sobre la bobina.

El cambio de alcance de amperímetros portátiles (clase 0,2; 0,5 y 1,5) se efectúa de dos maneras: una, utilizando la bobina del amperímetro con derivaciones, y la otra con la bobina dividida en secciones iguales. La figura V-11 ilustra el primer sistema. El ejemplo

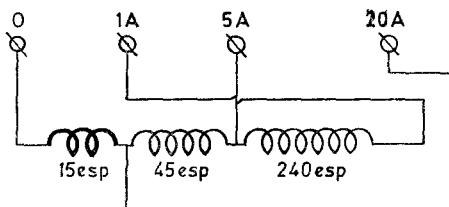


Figura V-11.

de la figura corresponde a un amperímetro de tres alcances: 1, 5 y 20 A. Para el alcance de 20 A se intercala en el circuito solamente la sección de 15 espiras. Los amperiovoltas que actúan son $15 \cdot 20 = 300$ Av. Para el alcance de 5 A se conectan en serie dos secciones, o sea, 15 esp. + 45 esp. Los amperiovoltas correspondientes son $60 \cdot 5 = 300$ Av. Para el alcance de 1 A se utilizan todas las espiras de la bobina, $15 + 45 + 240 = 300$ esp. $300 \cdot 1 = 300$ Av. En todos los alcances actúa el mismo número de amperiovoltas. La figura V-12 muestra el sistema de cambio de alcance mediante la bobina dividida en partes iguales. La bobina del amperímetro está dividida en cuatro secciones iguales correspondientes a 5 A cada una. Para el alcance de 5 A se conectan todas las secciones en serie (a), para el alcance de 10 A se conectan en serie dos pares de bobinas conectadas en paralelo y para el alcance de 20 A actúan todas las bobinas en paralelo. Con este

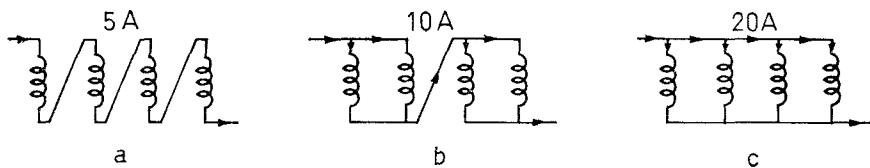


Figura V-12.

sistema se obtiene el número de amperiovueltas también constante en todos los alcances.

Frecuencímetro electromagnético de lengüetas vibrantes

El frecuencímetro de lengüetas es un instrumento comúnmente empleado en mediciones de frecuencias industriales. Su principio de funcionamiento es diferente al de los instrumentos electromagnéticos de hierro móvil. A pesar de ello por ser su parte principal un electroimán, es un instrumento electromagnético y se incluye su descripción en el presente capítulo.

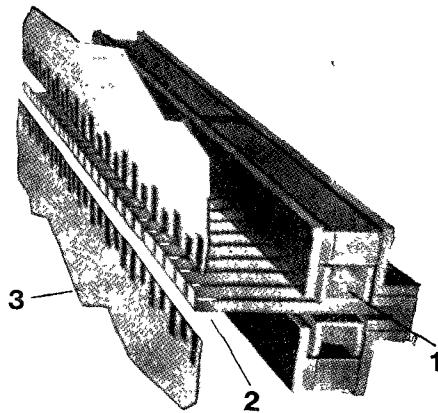


Figura V-13.

El funcionamiento del frecuencímetro de lengüetas está basado sobre un efecto denominado "resonancia mecánica". Cuando se somete una lámina elástica a una vibración, por ejemplo, mediante un campo magnético alterno exterior, ésta empieza a vibrar. La amplitud de esta vibración será máxima cuando la frecuencia de vibración impuesta del exterior coincide con la frecuencia de vibración propia de la lámina elástica. Este efecto denominado resonancia se utiliza en frecuencímetros de lengüetas vibrantes. La figura V-13 muestra su cons-

trucción (Hartmann & Braun). En un campo magnético de un electroimán energizado por la bobina (1), conectada a la corriente alterna cuya frecuencia se mide, está colocada una serie de láminas elásticas (2), ordenadas progresivamente según su propia frecuencia de vibración. El extremo libre de cada lámina termina en un ángulo recto presentando un pequeño cuadrado. La figura V-14 muestra dos cu-

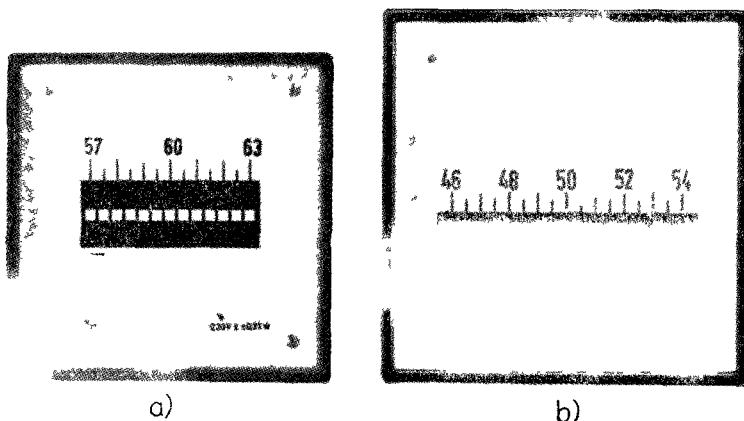


Figura V-14.

drantes, con sus respectivas escalas de dos frecuencímetros: uno de alcance 57-63 (Hartmann & Braun) y el otro de alcance 46-54 Hz (Siemens).

El electroimán energizado por la corriente alterna cuya frecuencia se mide, produce un campo magnético periódicamente variable, el cual ejerce una atracción periódica sobre las lengüetas. Cuando la frecuencia de resonancia de la lengüeta coincide con la frecuencia de la corriente alterna que energiza el electroimán, la lengüeta vibra con gran amplitud.

Las dos lengüetas laterales están afinadas a la frecuencia 0,5 Hz mayor y 0,5 Hz menor y, en consecuencia, vibrarán con una amplitud mayor y menor que la lengüeta en resonancia. La figura V-15 muestra cuatro ejemplos de lecturas del frecuencímetro correspondientes a las frecuencias: 49,25; 49,50; 49,75 y 50,00. Se requiere cierta práctica para efectuar lecturas rápidas y exactas.

Las lengüetas se afinan variando su longitud (fracciones de milímetros) y modificando su masa en el extremo libre. Esto último se obtiene estañando el extremo libre de la lengüeta hasta obtener la re-

sonancia requerida. También se puede afinar las vibraciones efectuando pequeñas perforaciones. La figura V-16 muestra diferentes tipos de lengüetas. Las dimensiones de las lengüetas varían según el tipo y tamaño del instrumento. Su longitud oscila entre 20 y 60 mm, su ancho entre 3 y 5 mm y su espesor entre 0,2 y 0,5 mm.

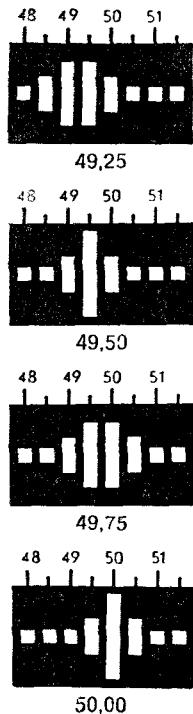


Figura V-15.

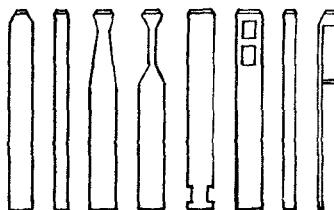


Figura V-16.

Existen dos métodos para hacer vibrar las lengüetas, uno directo y el otro indirecto. El método directo está ilustrado en la figura V-17 y el indirecto en la figura V-18. En el primero, la hilera de lengüetas está fijada directamente al núcleo del electroimán, de manera que las vibraciones del núcleo energizado por la corriente alterna se transmiten directamente a las lengüetas. Empieza a vibrar la lengüeta de resonancia correspondiente a la frecuencia de la corriente. En el sistema indirecto entra en vibración la base (4), suspendida en forma elástica mediante el soporte (3) y resortes (6), transmitiendo sus vi-

braciones a las lengüetas (5). La diferencia principal entre estos dos métodos consiste en que la masa del cuerpo vibrante es de considerable valor en el sistema indirecto en comparación con el sistema directo. Como consecuencia de estas diferentes masas el sistema directo se utiliza en frecuencímetros de bajas y de altas frecuencias

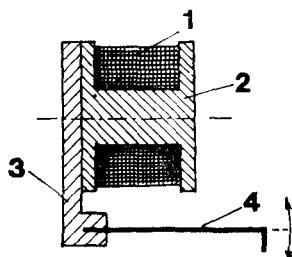


Figura V-17.

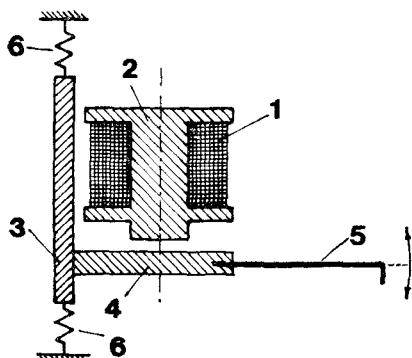


Figura V-18.

(10 a 1.000 Hz) y el sistema indirecto se puede emplear únicamente en frecuencímetros para medir frecuencias no mayores de 100 Hz. El alcance de medición de un frecuencímetro de lengüetas se duplica conectando en serie, con el arrollamiento del electroimán, un diodo semiconductor, de modo que la corriente que circula es una corriente rectificada de media onda. En consecuencia, las pulsaciones del campo magnético se reducen a la mitad, una vez en cada ciclo, y las lengüetas entran en resonancia con doble valor de frecuencia de la tensión

aplicada a la bobina del electroimán. Este mismo efecto se obtiene utilizando un *imán* permanente, cuyo campo constante se superpone sobre el campo variable del electroimán (fig. V-19). Cuando la inten-

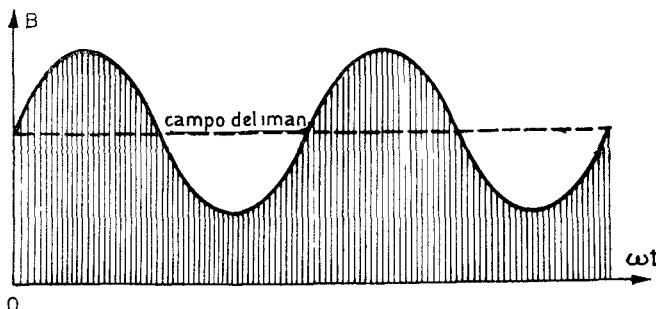


Figura V-19.

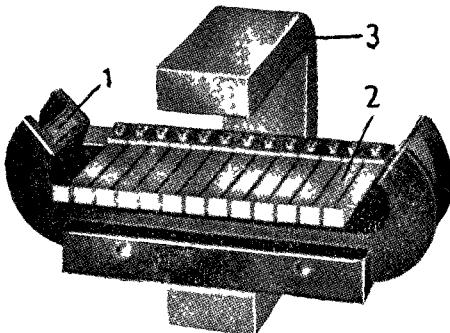


Figura V-20.

sidad del campo constante superpuesto es mayor que la amplitud del campo magnético alterno, se obtiene un campo pulsante, cuya amplitud aparece solamente una vez en cada ciclo. La figura V-20 muestra un frecuencímetro con el imán permanente (3).

Capítulo VI

INSTRUMENTOS ELECTRODINAMICOS

Generalidades

El sistema electrodinámico funciona en base a la acción reciproca de dos flujos magnéticos generados en dos bobinas. La corriente que se va a medir se hace circular por las bobinas, siendo los flujos proporcionales a la corriente medida. La figura VI-1 muestra el prin-

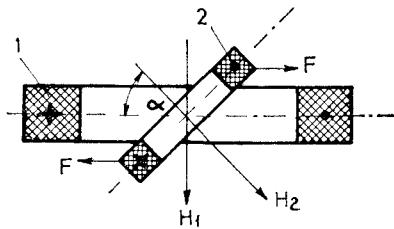


Figura VI-1.

cipio de construcción del mecanismo, el cual consiste en una bobina fija (1) y otra móvil (2). Las fuerzas (F) que actúan entre las dos bobinas originan el momento motor (M_m) que hace girar la bobina móvil dentro de la bobina fija en dirección hacia la posición en la cual los flujos magnéticos de ambas bobinas coincidan. El momento motor (M_m) está compensado por el momento antagonista (M_a) (véase Capítulo III). Este último está originado por dos espirales (3), las cuales conducen corriente a la bobina móvil, de igual manera como ocurre

en instrumentos magnetoeléctricos. La figura VI-2 muestra un sistema electrodinámico utilizado para la construcción de un vatímetro. Como se puede apreciar en la figura, la aguja indicadora está fijada al eje de la parte móvil. Sobre la parte móvil actúa el dispositivo amortiguador (4).

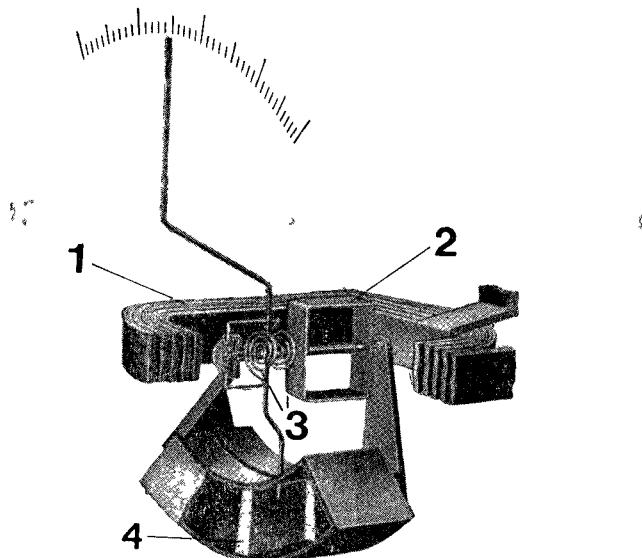


Figura VI-2.

Cuando, debido a su conexión en serie, por ambas bobinas circula la misma corriente, el sistema puede funcionar como un voltímetro o como un amperímetro. Si se desea utilizar el sistema para vatímetro, la bobina fija de baja resistencia se conecta en serie y la bobina móvil en paralelo con el circuito. En consecuencia, la corriente del receptor circula por la bobina fija y la corriente que es función de la tensión circula por la bobina móvil. En este caso el sistema constituye un vatímetro y mide potencia.

Al conectar un instrumento electrodinámico a la corriente alterna, el sentido de la corriente varía en ambas bobinas simultáneamente y, en consecuencia, el momento motor sigue actuando en el mismo sentido. La diferencia básica entre el funcionamiento de un instrumento magneto-eléctrico y el de un instrumento electrodinámico radica en el carácter del flujo magnético principal. En un instrumento magnetoeléctrico el flujo principal es originado por el imán permanente.

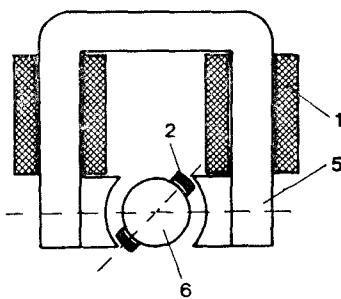


Figura VI-3.

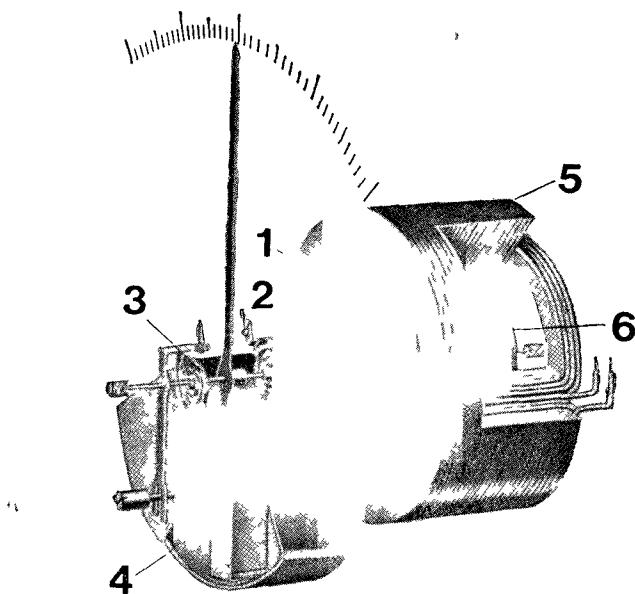


Figura VI-4.

nente; en cambio, en un instrumento electrodinámico se origina en la bobina fija. Mientras el flujo magnético del imán permanece constante, el flujo de la bobina fija varía su sentido y su amplitud según la frecuencia de la corriente que circula.

Los instrumentos electrodinámicos se construyen en dos variantes: *a)* Instrumentos electrodinámicos sin núcleo (figs. VI-1 y VI-2). *b)* Instrumentos ferrodinámicos (figs. VI-3, VI-4, VI-5 y VI-6).

Un instrumento ferrodinámico se diferencia de un instrumento electrodinámico sin núcleo, por tener núcleos de materiales magnéticos en ambas bobinas, figura VI-3. El principio de funcionamiento es el mismo que en un instrumento sin núcleo, pero el empleo de núcleos ferromagnéticos permite la obtención del flujo magnético de valor elevado con un consumo mínimo de energía. Como se puede apreciar en la figura VI-3, el circuito magnético es similar al de un instrumento

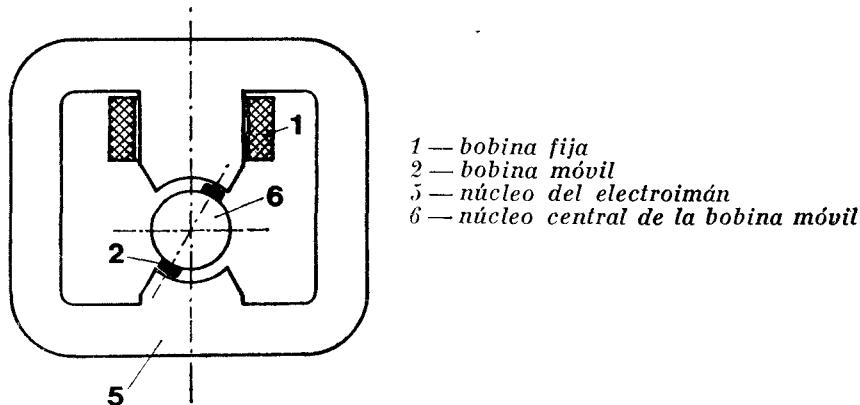


Figura VI-5.

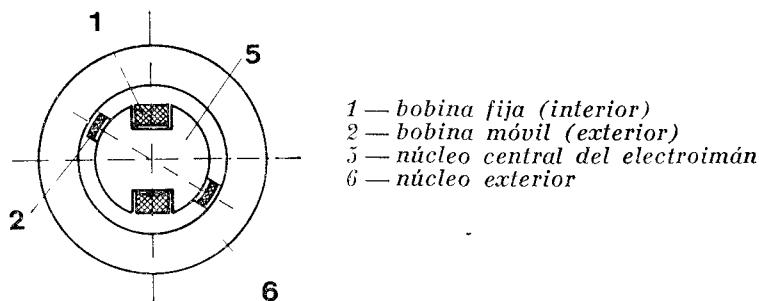


Figura VI-6.

magnetoeléctrico, con la diferencia de que el imán fijo está sustituido por un electroimán. La figura VI-4 muestra los detalles de construcción de un instrumento ferrodinámico. La bobina fija (1) compuesta de dos secciones, está colocada sobre el núcleo (5) y la bobina móvil (2) gira en un entrehierro existente entre los polos del electroimán

y el núcleo cilíndrico fijo (6). Las dos espirales (3) conectan la bobina móvil eléctricamente y originan a la vez el momento antagonista M_a . El amortiguador (4) actúa sobre el eje de la parte móvil.

Cuando el núcleo del electroimán está construido en forma cilíndrica, tal como lo muestra la figura VI-4, presenta la gran ventaja de ofrecer una protección contra influencia de campos magnéticos externos. Las figuras VI-5 y VI-6 muestran dos diferentes versiones del circuito magnético del instrumento ferrodinámico.

Momento motor

El momento motor (M_m) del sistema electrodinámico se puede determinar de varias maneras. La fórmula del momento motor que sigue se basa en el equilibrio energético.

La energía suministrada por el sistema traductor se puede expresar por $dE = u_1 i_1 dt + u_2 i_2 dt$, donde las magnitudes señaladas con el 1 se refieren a la bobina fija y las señaladas con el 2 a la bobina móvil.

Al moverse la bobina móvil dentro de la bobina fija, varía la inductancia mutua M_{12} de ambas bobinas, mientras que las inductancias propias L_1 y L_2 son constantes debido a que no dependen de la posición de una bobina con respecto a la otra. Por tanto, en ambas bobinas se generan:

$$e_1 = -\frac{dM_{12}}{dt} \cdot i_2 \quad \text{y} \quad e_2 = -\frac{dM_{12}}{dt} \cdot i_1$$

Según la 2.^a ley de Kirchhoff

$$u_1 + e_1 = i_1 r_1 \quad \text{y} \quad u_2 + e_2 = i_2 r_2$$

donde r_1 y r_2 son las resistencias de ambas bobinas. De esto surge

$$u_1 = i_1 r_1 - e_1 = i_1 r_1 + \frac{dM_{12}}{dt} \cdot i_2$$

$$u_2 = i_2 r_2 - e_2 = i_2 r_2 + \frac{dM_{12}}{dt} \cdot i_1$$

sustituyendo estas caídas de tensión en la ecuación energética tenemos:

$$\begin{aligned} dE &= \left(i_1 r_1 + \frac{dM_{12}}{dt} \cdot i_2 \right) i_1 dt + \left(i_2 r_2 + \frac{dM_{12}}{dt} \cdot i_1 \right) i_2 dt = \\ &= i_1^2 r_1 dt + i_2^2 r_2 dt + 2i_1 i_2 dM_{12} \end{aligned}$$

La energía dE recibida por el sistema se convierte en:

- calor en las resistencias de ambas bobinas ($i_1^2 r_1 dt + i_2^2 r_2 dt$)
- energía necesaria para mover la parte móvil ($M_m d\alpha$)
- incremento de la energía magnética ($i_1 i_2 dM_{12}$)

De acuerdo con la ecuación anterior tenemos:

$$i_1^2 r_1 dt + i_2^2 r_2 dt + 2i_1 i_2 \frac{dM_{12}}{dt} = i_1^2 r_1 dt + i_2^2 r_2 dt + M_m d\alpha + i_1 i_2 dM_{12}$$

de esto surge que $i_1 i_2 dM_{12} = M_m d\alpha$ y el momento motor es $M_m = i_1 i_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha}$.

El momento motor es proporcional al producto de las intensidades que circulan por las bobinas y a la derivada de la inducción mutua con respecto al ángulo de desviación.

El momento antagonista (M_a) proporcionado por las espirales es proporcional al ángulo de desviación

$$M_a = m \cdot \alpha$$

En el estado de equilibrio, $M_m = M_a$ o sea, $i_1 i_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha} = m \cdot \alpha$ y por tanto

$$\alpha = \frac{1}{m} \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{dM_{12}}{d\alpha}$$

De esta ecuación surge que el cambio del sentido de la corriente en una bobina origina el cambio del sentido de movimiento de la parte móvil. Cuando las corrientes cambian su sentido en ambas bobinas, simultáneamente, el sentido del movimiento no varía.

El momento motor M_m en el sistema *ferrodinámico* depende de la i_2 en la bobina móvil y del flujo magnético originado por la corriente que circula por la bobina del electroimán. Por lo general, el entrehierro que se halla entre el núcleo del electroimán y el núcleo central es uniforme. Por tanto, el momento motor M_m del sistema ferrodinámico se calcula de la misma manera que el momento motor del sistema magnetoeléctrico. La única diferencia es que, cuando se trata de corriente alterna, la fórmula es válida para valores instantáneos.

$$M_m = B \cdot i_2 \cdot S \cdot n_2$$

donde

$B = B_{\max} \cdot \operatorname{sen} \omega t$ es la inducción magnética en el entrehierro.

$i_2 = i_{2\max} \operatorname{sen} (\omega t + \psi)$ es la corriente en la bobina móvil.

ψ es el ángulo entre vectores B_{\max} e $i_{2\max}$.

S es la sección activa de la bobina móvil.

n_2 es el número de espiras de la bobina móvil.

El voltímetro

El voltímetro electrodinámico, básicamente, se construye conectando en serie dos bobinas, fija y móvil, y una resistencia adicional (R_a) (fig. VI-7). Las reactancias de ambas bobinas deben ser de valor

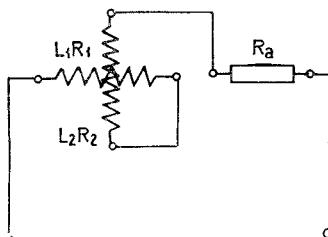


Figura VI-7.

despreciable en relación al valor de la resistencia adicional. Cuando se cumple esta condición, se puede asumir que la corriente que circula por las bobinas es

$$I_v = \frac{U}{Z} \approx \frac{U}{R_v} \quad \text{donde} \quad R_v = R_a + R_1 + R_2$$

Con referencia a la ecuación que expresa el ángulo de desviación de la parte móvil tenemos

$$\alpha = \frac{1}{m} \cdot i_1 \cdot i_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha} = C \cdot i_1 \cdot i_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha}$$

En el caso de voltímetro (ambas bobinas conectadas en serie), $i_1 = i_2 = i$;

$$C \cdot i^2 \cdot \frac{dM_{12}}{d\alpha} = C \cdot \left(\frac{U}{-R_v} \right)^2 \cdot \frac{dM_{12}}{d\sigma} = C_v \cdot U^2 \cdot \frac{dM_{12}}{d\sigma} \quad ; \quad C_v = \frac{C}{R_v^2}$$

La tensión al cuadrado y la variación de la inductancia mutua con relación al ángulo de desviación indican que la escala no es uniforme. La figura VI-8 ofrece un ejemplo de la escala de un voltímetro electrodinámico.

En voltímetros de clases superiores se obtiene una escala aproximadamente uniforme, mediante una cuidadosa selección del tamaño de ambas bobinas y adelantando la aguja indicadora en un ángulo de 10°

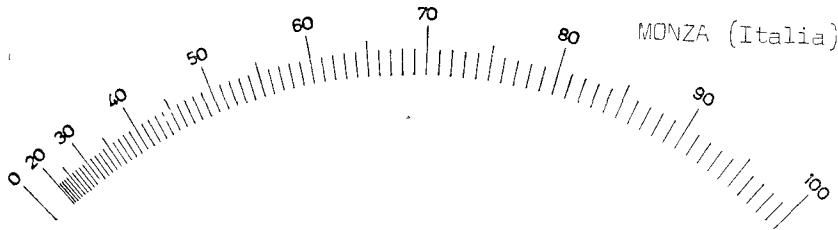


Figura VI-8.

a 15° con respecto al plano de la bobina móvil. El cambio del alcance del voltímetro se obtiene cambiando el valor de la resistencia adicional R_a , o sea, de la manera usual.

La potencia requerida por las bobinas del voltímetro es, en comparación con lo necesario para otros tipos de instrumentos, relativamente grande. Por lo general, el valor de esta potencia se halla entre 3 y 10 VA; a esta potencia se suma la que se disipa en la resistencia adicional. La intensidad de corriente depende del alcance del voltímetro. Los voltímetros de bajo alcance llegan a lograr intensidades de hasta 0,5 A; en cambio, en los voltímetros de mayor alcance (250 a 1.000 V), no se sobrepasa los 30 mA.

El amperímetro

Se emplean dos sistemas de conexión interna en los amperímetros electrodinámicos: 1) en el cual las bobinas, fija (1) y móvil (2) están conectadas en serie (fig. VI-9), y 2) en el cual las bobinas, fija (1) y móvil (2) están conectadas en paralelo (fig. VI-10).

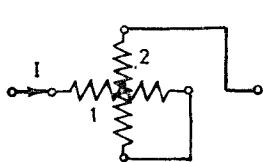


Figura VI-9.

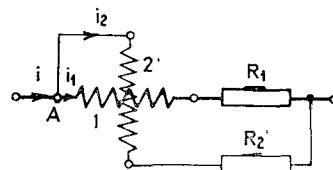


Figura VI-10.

El primero se emplea en amperímetros de alcance 0,5 A como máximo. Lo reducido del valor tope se debe al calentamiento por la corriente de las dos espirales antagonistas, pues, como es sabido, estas espirales, además de originar el momento antagonista, sirven de co-

nexión eléctrica de la bobina móvil. La conexión en serie implica el paso de la totalidad de la corriente que se mide, a través de las espirales. Cuando el calentamiento de las espirales es excesivo, varía el módulo de elasticidad de ellas y, en consecuencia, el instrumento lo acusa con un error de signo positivo.

El ángulo de desviación de la parte móvil se expresa por

$$\alpha = C \cdot i^2 \cdot \frac{dM_{12}}{da}$$

De esto surge que la escala tiene características similares a la del voltímetro electrodinámico.

El segundo sistema de conexión interna [bobinas fija (1) y móvil (2) conectadas en paralelo] se emplea en amperímetros de intensidades mayores de 0,5 A. En este caso la corriente i que se mide se bifurca en el punto A (fig. VI-10), dando lugar a la corriente i_1 de la bobina fija y la corriente i_2 de la bobina móvil. Con corriente alterna, el instrumento acusará correctamente cuando la intensidad i que se mide sea igual a la suma algebraica de las corrientes parciales i_1 e i_2 . Esta condición se obtiene siempre y cuando no haya desfase entre i_1 e i_2 .

La intensidad i_1 circula por la bobina fija (1) de inductancia L_1 ; la intensidad i_2 circula por la bobina móvil (2) de inductancia L_2 . Cuando se mantenga constante la relación entre reactancias y resistencias de ambas bobinas, no se producirá desfase entre ambas corrientes. Esto se obtiene conectando en serie con cada una de las bobinas las resistencias de manganina ($\delta = \text{const.}$). Comparando los valores de las resistencias activas de las bobinas con los de las resistencias adicionales (R_1 y R_2), resultan los primeros de valor despreciable

$$\frac{L_1\omega}{R_1} = \frac{L_2\omega}{R_2} \quad \text{o} \quad \frac{L_1}{R_1} = \frac{L_2}{R_2}$$

Las impedancias respectivas son:

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + (L_1\omega)^2} = R_1 \sqrt{1 + \frac{(L_1\omega)^2}{R_1^2}}$$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + (L_2\omega)^2} = R_2 \sqrt{1 + \frac{(L_2\omega)^2}{R_2^2}}$$

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

Se utilizan dos sistemas para modificar el alcance del amperímetro electrodinámico: 1) se usan las derivaciones previstas en la bobina fija (igual como en el amperímetro electromagnético), y 2) se utilizan las bobinas fijas seccionadas. Cuando la bobina fija esté dividida en dos secciones, se obtienen dos alcances: uno, conectando las dos mitades en serie y otro conectando las dos mitades en paralelo.

La figura VI-11 muestra la conexión interna de un amperímetro de dos alcances con la bobina fija seccionada. La bobina fija del instrumento está dividida en dos mitades, 1_A y 1_B . A cada una de las

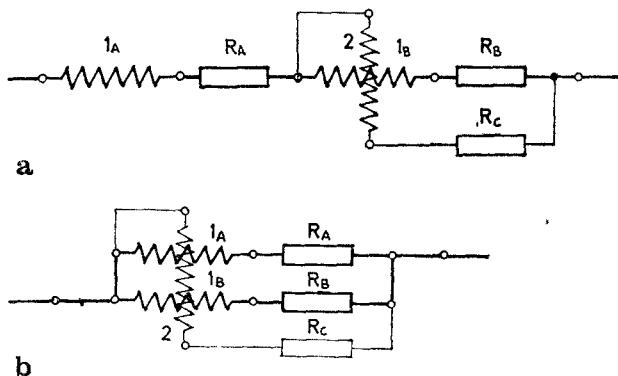


Figura VI-11.

secciones está conectada en serie una resistencia adicional de manganeso (R_A y R_B). Con la bobina móvil (2) está conectada otra resistencia adicional R_C . La bobina móvil está en paralelo con la sección 1_B de la bobina fija.

El vatímetro

El sistema electrodinámico se presta, especialmente, para la construcción de vatímetros. Como es sabido, el vatímetro es un instrumento que mide potencia activa. La potencia activa de corriente alterna se expresa por

$$P = U \cdot I \cdot \cos(U, I) = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Desde el punto de vista del uso dividimos los vatímetros en monofásicos y trifásicos. Debido a que el vatímetro trifásico es un conjunto de dos o tres sistemas monofásicos que actúan sobre el mismo eje indicador, nos limitamos en este capítulo a la descripción del vatímetro monofásico.

El vatímetro monofásico está compuesto por la bobina fija de muy baja impedancia, que, conectada en serie con el receptor, genera el flujo magnético proporcional a la intensidad de corriente que circula en el circuito, y por la bobina móvil por la cual circula corriente proporcional a la tensión. La bobina móvil, de muy baja impedancia, está conectada en serie con una resistencia adicional R_{ad} de alto valor. La resistencia adicional es de valor alto en comparación con la resistencia de la bobina. Por tanto

$$I_u = \frac{U}{R_b + R_{ad}} \quad \text{y por ser } R_b \ll R_{ad} \quad I_u = \frac{U}{R_{ad}}$$

De esto surge que la corriente I_u de la bobina de tensión está en fase con la tensión U (fig. VI-12), y que el ángulo entre los vectores de las corrientes es igual al ángulo de desfase φ entre la corriente I y la tensión U .

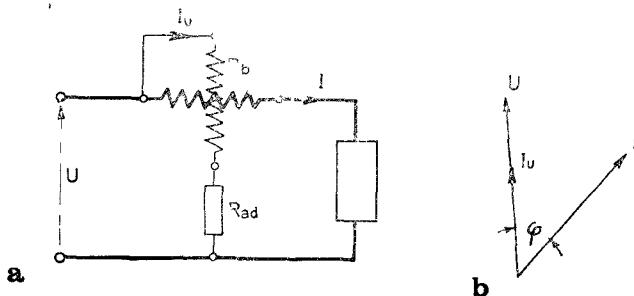


Figura VI-12.

La desviación de la parte móvil (cuando $M_m = M_a$) será

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{m} \cdot i_1 \cdot i_2 \cos(\hat{i}_1 \hat{i}_2) \frac{dM_{12}}{d\alpha} = C \cdot I \cdot \frac{U}{R_{ad}} \cos \varphi \frac{dM_{12}}{d\alpha} = \\ &= C_p U \cdot I \cdot \cos \varphi \frac{dM_{12}}{d\alpha} = C_p \cdot P \frac{dM_{12}}{d\alpha} = C'_p \cdot P \end{aligned}$$

por lo que es proporcional a la potencia.

El tipo de escala del vatímetro electrodinámico depende de la derivada $\frac{dM_{12}}{d\alpha}$. Seleccionando la forma y las dimensiones de ambas bobinas se puede obtener una escala casi uniforme.

Por lo general, los vatímetros electrodinámicos se fabrican en clases de exactitud superior (0,1; 0,2 y 0,5) como instrumentos portátiles y de laboratorio.

El cambio de alcance de intensidad en estos instrumentos se efectúa cambiando interconexiones entre varias secciones de bobina fija (fig. VI-13). La figura VI-13a, muestra la bobina fija del vatímetro dividida en dos secciones, las cuales conectadas en serie o en paralelo ofrecen dos alcances de intensidad. La figura VI-13b, muestra la bobina fija dividida en cuatro secciones, lo que permite obtener tres alcances de corriente nominal del vatímetro.

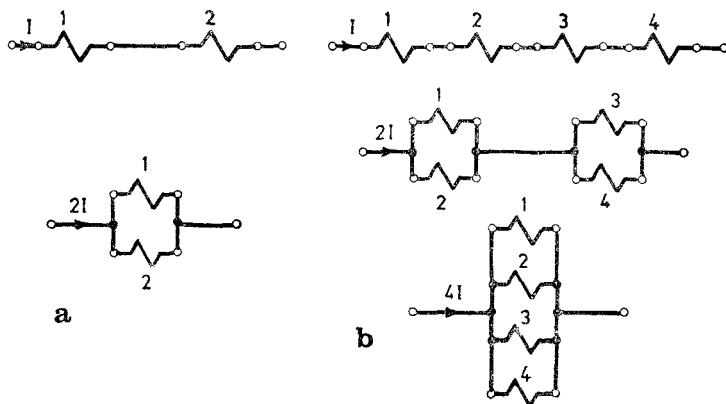


Figura VI-13.

En vatímetros, el cambio del alcance de tensión del circuito de la bobina móvil se efectúa de igual manera como en voltímetros, o sea, cambiando el valor de la resistencia adicional R_{ad} . La figura VI-14, muestra el circuito de la bobina móvil en un vatímetro de tres alcances de tensión: 30; 75 y 150 V. Este cambio de la resistencia adicional se efectúa conectando la tensión del circuito al correspondiente borne del instrumento.

La figura VI-15 muestra otro tipo de vatímetro (Hartman & Braun), en el cual se puede obtener dos alcances de intensidad (ver figura VI-13, a) y cuatro alcances de tensión. El cambio de alcance de la intensidad se efectúa mediante dos clavijas (1) y el cambio de alcance de tensión utilizando el selector (2).

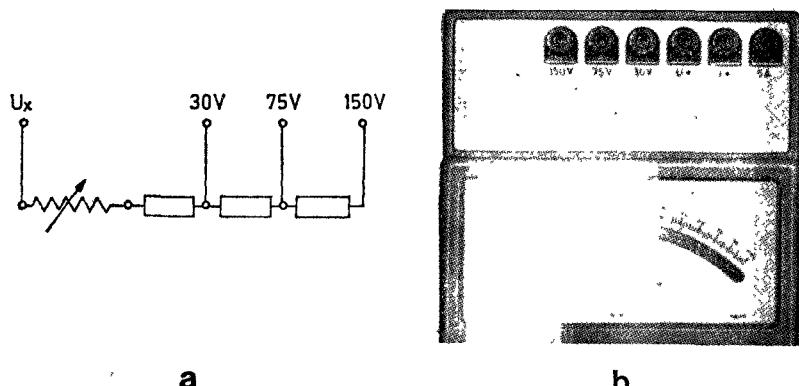


Figura VI-14.

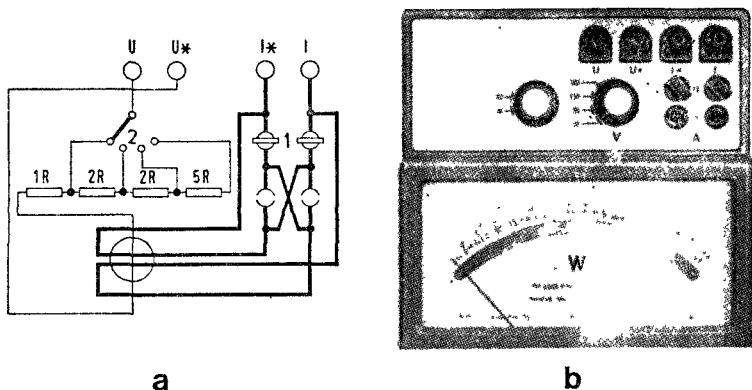


Figura VI-15.

Determinación de la constante de escala

Cuando se utiliza un vatímetro, de distintos alcances de tensión y de intensidad, es imprescindible determinar la constante de escala que corresponde a cualquiera de las diferentes combinaciones entre los diferentes alcances de tensión y de intensidad. La constante de escala de un instrumento (ver capítulo III) se calcula

$$C = \frac{\text{alcance del instrumento}}{\text{número de divisiones de la escala}}$$

En el caso del vatímetro, el alcance resultante es función de dos magnitudes, tensión e intensidad, de manera que la constante de escala se expresa por

$$C_w = \frac{\text{alcance de tensión} \times \text{alcance de intensidad}}{\text{número de divisiones de la escala}}$$

El vatímetro de la figura VI-15 tiene 4 alcances de tensión (30, 90, 150 y 300 V) y 2 alcances de intensidad (5, 10 A). Su escala está graduada en 150 divisiones. Las diferentes constantes de escala serán:

<i>Alcances</i>		<i>Constante</i>
5A	30V	$C_w = \frac{30 \cdot 5}{150} = 1 \text{ W/}^{\circ}$
5A	90V	$C_w = \frac{90 \cdot 5}{150} = 3 \text{ W/}^{\circ}$
5A	150V	$C_w = \frac{150 \cdot 5}{150} = 5 \text{ W/}^{\circ}$
5A	300V	$C_w = \frac{300 \cdot 5}{150} = 10 \text{ W/}^{\circ}$
10A	30V	$C_w = \frac{30 \cdot 10}{150} = 2 \text{ W/}^{\circ}$
10A	90V	$C_w = \frac{90 \cdot 10}{150} = 6 \text{ W/}^{\circ}$
10A	150V	$C_w = \frac{150 \cdot 10}{150} = 10 \text{ W/}^{\circ}$
10A	300V	$C_w = \frac{300 \cdot 10}{150} = 20 \text{ W/}^{\circ}$

Ampliación del alcance de tensión

El alcance de medición del vatímetro puede ser cambiado de acuerdo con la fórmula:

$$P_{\text{nom}} = U_{\text{nom}} \cdot I_{\text{nom}} \cdot \cos \varphi_{\text{nom}}$$

La tensión nominal puede ser aumentada conectando en serie una resistencia adicional calibrada con el circuito de la bobina móvil. El valor de esta resistencia debe ser calculado de acuerdo con las características del instrumento, o sea, manteniendo la relación $\frac{R}{U}$ constante.

Tabla de características del vatímetro de la figura VI-15
entre bornes de intensidad:

5 A	43 mΩ	53 µH
10 A	41 mΩ	13 µH

entre bornes de tensión:

30 V	3 000 Ω
90 V	9 000 Ω
150 V	15 000 Ω
300 V	30 000 Ω

Consideremos como ejemplo el vatímetro de la figura VI-15, para el cual ya hemos calculado las constantes. Cuando se necesita emplear este vatímetro en la red de 416 V, es imprescindible aumentar el alcance de tensión del instrumento. Según la tabla de características del instrumento, la resistencia del circuito de tensión correspondiente a 300 V es de 30.000 Ω, o sea, 100 Ω/V. Para mantener constante esta relación, elegimos 450 V como la tensión nominal para poder conectar el instrumento a la red de 416 V. En el alcance de 450 V, el circuito de tensión del vatímetro debe tener la resistencia total de 45.000 Ω y, por tanto, se intercala la resistencia adicional de 15.000 Ω. Con este nuevo alcance, las constantes de escala son las siguientes:

$$\text{en } 5 \text{ A y } 450 \text{ V} \quad C_w = \frac{5 \cdot 450}{150} = 15 \text{ W/º}$$

$$\text{en } 10 \text{ A y } 450 \text{ V} \quad C_w = \frac{10 \cdot 450}{150} = 30 \text{ W/º}$$

La figura VI-16a, muestra el esquema de conexión entre el vatímetro y la resistencia adicional exterior (fig. VI-16b).

La resistencia adicional exterior se conecta siempre al borne de salida del circuito de tensión del vatímetro (fig. VI-12) y nunca al borne de entrada, como aparece en la figura VI-17. En el caso de conectar la resistencia adicional incorrectamente (fig. VI-17), aparecerá entre la bobina fija y la bobina móvil una gran diferencia de potenciales. Esta diferencia puede dañar seriamente el instrumento por originar una

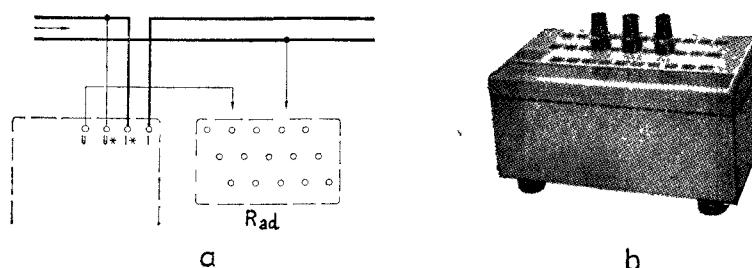


Figura VI-16.

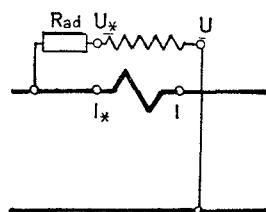


Figura VI-17.

perforación entre bobinas. También, debido a las cargas electrostáticas, puede producirse una fuerza de atracción entre las bobinas, dando lugar a un error adicional en las indicaciones del instrumento.

En mediciones de potencia rutinarias se utilizan vatímetros construidos para factor de potencia de valores comprendidos entre 0,8 y 1,0. Para usos especiales se emplean vatímetros construidos para factores de potencia bajos ($\cos \varphi = 0,5; 0,2$ y $0,1$).

El varímetro

El varímetro es un instrumento similar al vatímetro que sirve para mediciones directas de potencia reactiva.

Como es sabido, en corriente alterna se necesita determinar los tres tipos de potencia: 1) La potencia aparente ($U \cdot I$) en VA (voltioamperios); 2) La potencia activa o real ($U \cdot I \cdot \cos \varphi$) en W (vatio), y 3) La potencia reactiva ($U \cdot I \cdot \operatorname{sen} \varphi$) en VAr (voltioamperios reactivos). El diagrama fasorial de la figura VI-18 permitirá analizar estos tres tipos de potencia. La potencia aparente, debido a que es el producto de la tensión por la intensidad, se determina mediante lecturas del voltímetro y del amperímetro. La potencia activa se mide directamente

con el vatímetro, instrumento ya descrito. La potencia reactiva se determina mediante un cálculo efectuado en base a los valores obtenidos de mediciones de potencias aparente y activa. También se puede medir directamente la potencia reactiva utilizando el varímetro.

El varímetro es un instrumento muy útil para mediciones de potencia reactiva en sistemas monofásicos. En sistemas trifásicos se mide la potencia reactiva empleando vatímetros comunes conectándolos de manera especial aprovechando particularidades del sistema trifásico. (Ver 3.^{er} tomo: Potencia y Energía.)

El varímetro mide la potencia reactiva que se expresa por

$$P = U \cdot I \cdot \operatorname{sen} (U, I) = U \cdot I \cdot \operatorname{sen} \varphi = U \cdot I \cdot \cos (90^\circ - \varphi)$$

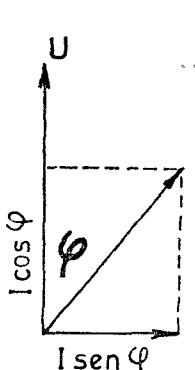


Figura VI-18.

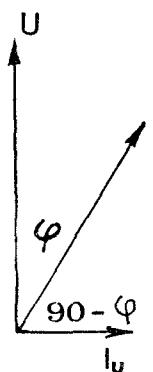


Figura VI-19.

Por la bobina de intensidad (fija) del varímetro circula la corriente I del circuito y por la bobina de tensión (móvil) circula la corriente I_u proporcional a la tensión del circuito. Por tanto, la conexión del instrumento al circuito es igual que la del vatímetro. Para que la desviación de la parte móvil sea proporcional a la potencia reactiva es necesario desfasar la corriente I_u en 90° con respecto a la tensión U (fig. VI-19). El momento motor se expresa

$$M_m = C \cdot I \cdot I_u \cdot \cos (I, I_u) = C \cdot I \cdot I_u \cdot \cos (90^\circ - \varphi) = C \cdot I \cdot I_u \cdot \operatorname{sen} \varphi$$

Debido a que I_u es proporcional a la tensión U tenemos

$$M_m = C' \cdot I \cdot U \cdot \operatorname{sen} \varphi$$

De la comparación del vatímetro con el varímetro deducimos que el vatímetro acusa la potencia activa cuando la corriente I_u , en el

circuito de tensión, está en fase con la tensión U y el varímetro acusa la potencia reactiva cuando la corriente I_u está desfasada 90° con respecto a la tensión U .

El desfase requerido en el circuito de tensión puede ser inductivo o capacitivo. Para conseguir el desfase inductivo se utiliza un circuito denominado de "Hummel" (fig. VI-20). Este circuito consiste

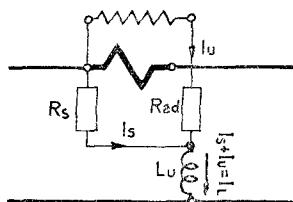


Figura VI-20.

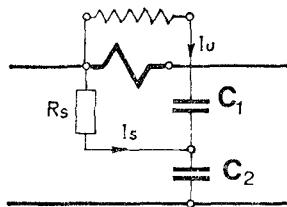


Figura VI-21.

en la conexión de una resistencia R_s en paralelo con la bobina móvil y su resistencia adicional R_{ad} , y, en serie con este conjunto, una inductancia L_u . Este desfase requerido se consigue durante el contraste del varímetro, regulando la resistencia en paralelo R_s . Esta regulación influye en el valor y sentido de la corriente I_s y en la corriente $I_L = I_s + I_u$. En consecuencia, también influye en el valor y la posición del vector de la corriente I_u . El ajuste, durante el contraste del varímetro, se hace conectando un receptor resistivo y haciendo circular la intensidad de corriente que corresponden al valor nominal del varímetro. Durante esta operación, la tensión conectada al circuito de tensión del varímetro debe tener también el valor nominal del instrumento. Luego, se regula la resistencia R_s hasta que el instrumento acuse cero.

El desfase capacitivo se obtiene utilizando el circuito de la figura VI-21. Comparándolo con el circuito anterior, se ve que en lugar de la resistencia R_{ad} y de la inductancia L_u , están conectados dos condensadores C_1 y C_2 . La resistencia R_s está conectada en paralelo con la bobina móvil y con su condensador C_1 . La regulación y contraste se efectúan de la misma manera como en el caso anterior, con la única diferencia que el vector de la corriente I_u se adelanta con respecto al vector de la tensión U debido a que es la capacidad la que actúa en lugar de hacerlo la inductancia. El instrumento tiende a acusar en sentido negativo y, por tanto, deben invertirse las conexiones de la bobina móvil en el circuito de tensión.

Logómetros electrodinámicos

La característica principal del logómetro o instrumento diferencial es la carencia del momento antagonista originado por las espirales. Como es sabido, el momento antagonista es función del ángulo de desviación de la parte móvil [$M_a = f(\alpha)$]. En el instrumento diferencial el momento antagonista está sustituido por un segundo momento motor de sentido contrario, de manera que, cuando la aguja indicadora se estabiliza, se cumple la condición que se expresa por

$$M_{m1} = M_{m2} \text{ (en instrumentos comunes } M_m = M_a\text{)}$$

El instrumento electrodinámico diferencial tiene la parte móvil compuesta de dos bobinas fijadas sobre el mismo eje. Las bobinas están conectadas de manera tal, que los momentos originados por cada una de ellas y la bobina fija actúen en sentido contrario. En la figura VI-22

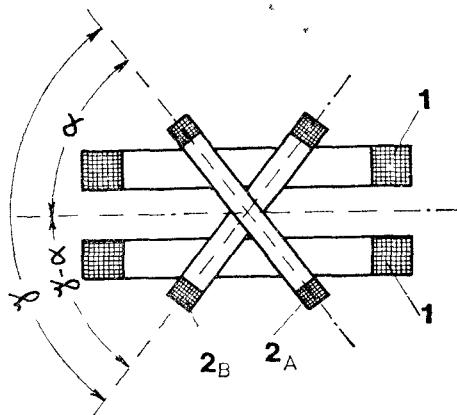


Figura VI-22.

se ve el sistema esquemáticamente. La bobina fija (1) está dividida en dos secciones. En el campo de la bobina fija giran dos bobinas móviles 2_A y 2_B fijadas sobre el mismo eje. La conexión eléctrica de ambas bobinas está realizada mediante muy flexibles cintas de oro o plata de manera que no originen momento antagonista. En consecuencia la aguja indicadora de un instrumento desconectado no tiene posición estabilizada ni determinada.

Consideremos el diagrama fasorial del sistema (fig. VI-23). Asumiendo que I es la corriente en la bobina (1) e I_A e I_B son las corrientes

en las bobinas móviles (2_A y 2_B), determinamos los momentos motores producidos por cada una de ellas con la bobina fija:

$$M_A = I \cdot I_A \cdot \cos(I \cdot \hat{I}_A) \frac{dM'}{d\alpha}$$

y

$$M_B = I \cdot I_B \cdot \cos(I \cdot \hat{I}_B) \frac{dM''}{d\alpha}$$

M' y M'' significan la inductancia mutua de las bobinas A y B con respecto a la bobina fija.

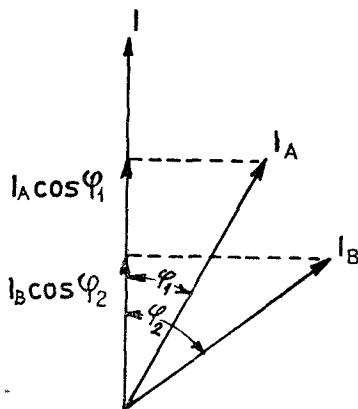


Figura VI-23.

Efectuando operaciones en las cuales se asume que la inducción B es uniforme, α es el ángulo de desviación de la bobina 2_A y γ es el ángulo entre bobinas 2_A y 2_B , tenemos:

$$\frac{dM'}{d\alpha} = -C_1 \cdot \sin \alpha \quad \text{y} \quad \frac{dM''}{d\alpha} = C_2 \cdot \sin(\gamma - \alpha)$$

Sustituyendo estos valores en las ecuaciones de momentos y denominando el ángulo $I \cdot \hat{I}_A = \varphi_1$ y el ángulo $I \cdot \hat{I}_B = \varphi_2$ obtenemos:

$$M_A = -C_1 \cdot I \cdot I_A \cdot \cos \varphi_1 \cdot \sin \alpha \quad \text{y} \quad M_B = C_2 \cdot \cos \varphi_2 \cdot \sin(\gamma - \alpha)$$

La condición de equilibrio de la parte móvil se presenta cuando

$$M_A + M_B = 0$$

por lo tanto

$$-C_1 \cdot I \cdot I_A \cdot \cos \varphi_1 \cdot \sin \alpha + C_2 \cdot I \cdot I_B \cdot \cos \varphi_2 \cdot \sin (\gamma - \alpha) = 0$$

$$\frac{C_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1}{C_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2} = \frac{\sin (\gamma - \alpha)}{\sin \alpha}$$

Cuando ambas bobinas son idénticas $C_1 = C_2$ y, por tanto

$$\frac{I_1 \cdot \cos \varphi_1}{I_2 \cdot \cos \varphi_2} = \frac{\sin (\gamma - \alpha)}{\sin \alpha}$$

$I_A \cos \varphi_1$ e $I_B \cos \varphi_2$ son las componentes activas de las corrientes que circulan en las bobinas móviles, proyectadas sobre el vector de la corriente en la bobina fija. La desviación de la parte móvil depende del cociente de las componentes activas.

El fasímetro (Cofímetro)

El sistema electrodinámico de bobinas cruzadas se emplea en la construcción de instrumentos que indican el factor de potencia. La figura VI-24 muestra el esquema del fasímetro. La bobina fija (1) dividida en dos secciones conectada en serie con el receptor es de intensidad. Con una de las bobinas móviles (2_A) está conectada en serie la resistencia activa R y con la otra (2_B) una inductancia L . Se puede asumir que las corrientes I_A e I_B en las bobinas 2_A y 2_B están desfasadas entre sí en 90° (fig. VI-25). Además, la corriente I_A está en fase con la tensión U . Asumiendo que los números de espiras de ambas bobinas móviles son iguales y que el ángulo γ entre ellas es de 90° , se puede expresar:

$$\frac{I_A \cos \varphi}{I_B \cos (90 - \varphi)} = \frac{\sin (90 - \alpha)}{\sin \alpha}$$

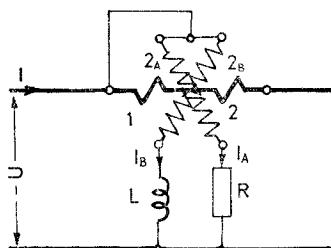


Figura VI-24.

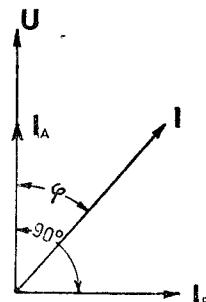


Figura VI-25.

Cuando las impedancias de ambas bobinas tienen valores calculados para que $I_A = I_B$, tenemos:

$$\frac{\cos \phi}{\operatorname{sen} \phi} = \frac{\cos \alpha}{\operatorname{sen} \alpha} \quad \text{y} \quad \alpha = \phi$$

En resumen, la desviación de la parte móvil es función del desfase, o sea, del factor de potencia, $\cos \phi$.

La escala puede ser graduada en grados del ángulo ϕ , pero el tipo de escala más utilizada es la representada en la figura VI-26, graduada en unidades del factor de potencia, $\cos \phi$.



Figura VI-26.

El frecuencímetro

En la construcción de frecuencímetros electrodinámicos se utiliza el esquema que muestra la figura VI-27. La bobina fija (1) está conectada en serie con una de las bobinas móviles (2_A) y con una resistencia

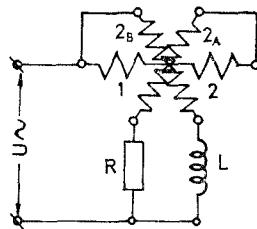


Figura VI-27.

activa R . La otra bobina móvil (2_B) está conectada en serie con la inductancia L . Al aumentar la frecuencia aumenta la reactancia ($L\omega$) del circuito de la bobina móvil 2_B y, en consecuencia, disminuye la corriente I_B , mientras la corriente I_A de la bobina con resistencia óhmica se mantiene constante. Eso produce el desequilibrio de momentos y, en consecuencia, la parte móvil cambia su posición.

Capítulo VII

INSTRUMENTOS DE INDUCCION

El funcionamiento de los instrumentos de inducción se basa en la acción mutua de los flujos magnéticos, periódicamente variables (producidos por la corriente alterna) y las corrientes inducidas por estos flujos en la parte móvil del instrumento. Por lo general, la parte móvil no consiste en una bobina, sino en un elemento metálico (conductor). Los flujos magnéticos se originan en un núcleo bobinado fijo (o núcleos), cuyo arrollamiento se conecta a la corriente alterna que se va a medir. Las corrientes que se inducen en la parte móvil son las denominadas corrientes Foucault, Eddy, parásitas o de torbelino.

El sistema motor de inducción se utiliza para construcción de amperímetros, voltímetros y vatímetros de corriente alterna, pero su principal aplicación es en la construcción de medidores de energía de corriente alterna. A los medidores de energía dedicamos un amplio capítulo en el 3.^{er} tomo de este manual.

La ventaja del uso del sistema motor de inducción es la posibilidad de obtener con él un momento motor de elevado valor y de grandes ángulos de desviación de la parte móvil. Se pueden obtener ángulos de desviación de hasta 330°, lo cual es muy conveniente en instrumentos de tablero. En cambio, este sistema motor no se presta para la construcción de instrumentos de altas clases de exactitud (de laboratorio), por ser muy sensible a las variaciones de frecuencia.

Los instrumentos de inducción se dividen:

1. Según el número de flujos magnéticos generados,
 - a. Sistema de un flujo.
 - b. Sistema de dos flujos.
2. Según la construcción,
 - a. Instrumentos de disco.
 - b. Instrumentos de tambor.
 - c. Instrumentos de bobina móvil.

La figura VII-1 muestra el principio de construcción del sistema que trabaja en base de un flujo magnético. La bobina magnetizante (1) está arrollada sobre un núcleo laminado (2). La corriente alterna que se mide, circula por la bobina originando en el núcleo un flujo magnético periódicamente variable. El flujo atraviesa el entrehierro en el cual está colocado un disco de aluminio (3). La forma y la ubicación del disco en el entrehierro del electroimán, determinan que sólo parte del flujo pasa por él. Las corrientes de Foucault inducidas en el disco por el flujo originado en el electroimán, producen un flujo

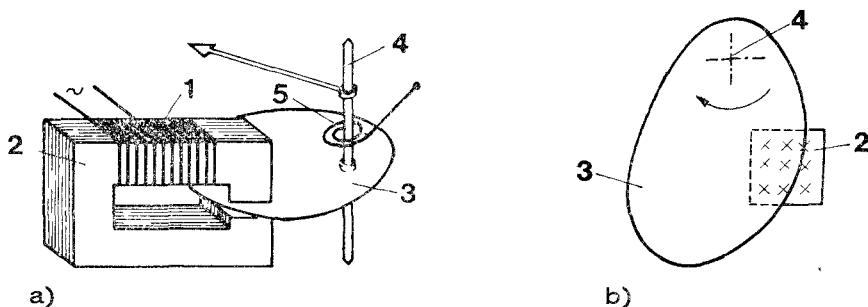


Figura VII-1.

magnético de sentido contrario que debilita el flujo principal. La parte móvil tiende a colocarse en la posición en la cual aumenta el flujo y, en consecuencia, el disco se mueve en sentido señalado con la flecha (fig. VII-1, b). El momento antagonista (M_a) se origina en la espiral (5).

Hay instrumentos de inducción que trabajan en base a un flujo magnético, que, por su construcción, se ubican en el grupo de los instrumentos de bobina móvil. En este tipo de instrumentos no actúan las corrientes de Foucault, sino las corrientes inducidas en la bobina móvil. El sistema motor ilustrado en la figura VII-2, se asemeja a un transformador; la bobina fija (1) actúa como primario y la bobina (2), desplazable sobre el mismo núcleo (3), actúa como secundario del transformador en cortocircuito. La corriente secundaria inducida en la bobina móvil produce el flujo de sentido contrario al generado por la bobina fija (primaria), originando la fuerza de repulsión que desplaza la bobina móvil y el indicador (4). El momento antagonista se origina en las espirales 5.

La figura VII-3 muestra otra variante del sistema de un flujo, que se asemeja por su construcción al sistema ferrodinámico. El sistema, debido a su alto valor del momento motor, se utiliza en la construcción de voltímetros y amperímetros registradores.

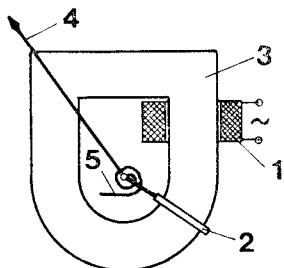


Figura VII-2.

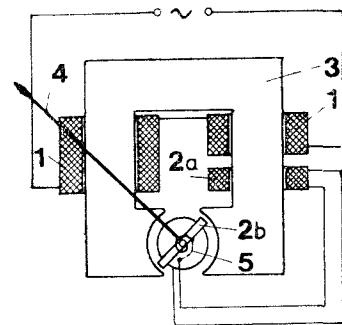


Figura VII-3.

Los instrumentos de inducción que trabajan en base a dos flujos magnéticos se construyen en dos variantes: 1) El flujo magnético ϕ originado en un electroimán se divide en dos flujos parciales ϕ_1 y ϕ_2 , de manera que sobre la parte móvil (1) actúan los dos, figura VII-4a, y 2) Dos flujos ϕ_1 y ϕ_2 se originan directamente en dos electroimanes separados para actuar sobre la parte móvil, figura VII-4b.

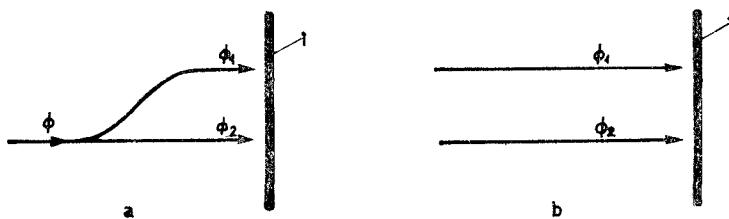


Figura VII-4.

Los dos flujos magnéticos ϕ_1 y ϕ_2 , que actúan sobre la parte móvil del sistema están desfasados en el espacio y en el tiempo. Esta doble condición se obtiene, como ya hemos mencionado, de dos maneras. Consideremos la variante 1, en la cual un electroimán genera un flujo principal ϕ . El extremo del polo de este electroimán está dividido, mediante una ranura (fig. VII-5), en dos partes. Sobre una de estas partes está colocada una espira de alambre de cobre, cortocircuitada, denominada "espira de sombra". En la espira de sombra circula la corriente inducida I_2 (principio de transformadores), que por sus

amperio vueltas contrarios disminuye y retrasa la parte ϕ_2 del flujo, la cual atraviesa la sección del polo circundada por la espira. En consecuencia, actúan dos flujos (ϕ_1 y ϕ_2) desfasados en el espacio y en el tiempo (fig. VII-4a). Estos dos flujos, periódicamente variables, inducen en la parte móvil (disco) las fuerzas electromotrices e_1 y e_2 y,

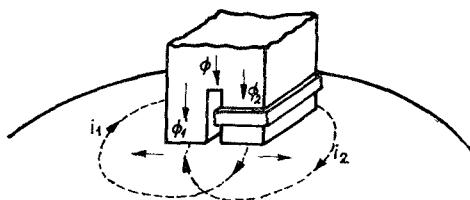


Figura VII-5.

en consecuencia, circulan las corrientes de Foucault i_1 e i_2 , figura VII-6. En la figura se observa que las corrientes i_1 en un sector de su trayectoria pasan por debajo del flujo ϕ_2 , y las corrientes i_2 en un sector de su trayectoria pasan por debajo del flujo ϕ_1 . En consecuencia, la acción recíproca entre el flujo ϕ_1 y la corriente i_2 , y entre el flujo ϕ_2 y la corriente i_1 , en la parte móvil, origina un momento motor que

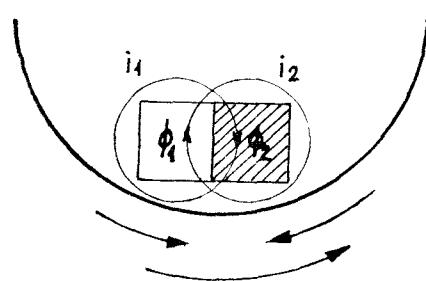


Figura VII-6.

tiende a mover el disco siguiendo la dirección: "flujo adelantado - flujo atrasado". En la figura VII-7 se puede apreciar el principio de construcción del sistema basado en la variante 1.

El fenómeno se puede explicar más fácilmente sobre la variante 2, caso en el cual los dos flujos ϕ_1 y ϕ_2 se generan en dos idénticos electroimanes separados 1 y 2, figura VII-8. Tal como en el caso ante-

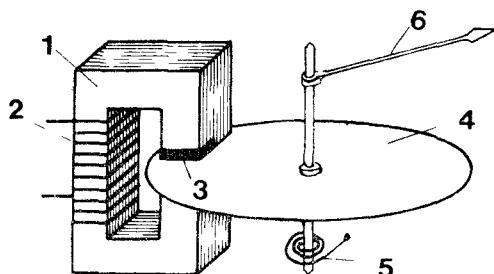


Figura VII-7.

- 1 — núcleo del electroimán
 2 — bobina magnetizadora
 3 — espira de sombra
 4 — disco de aluminio
 5 — espiral antagonista
 6 — aguja indicadora

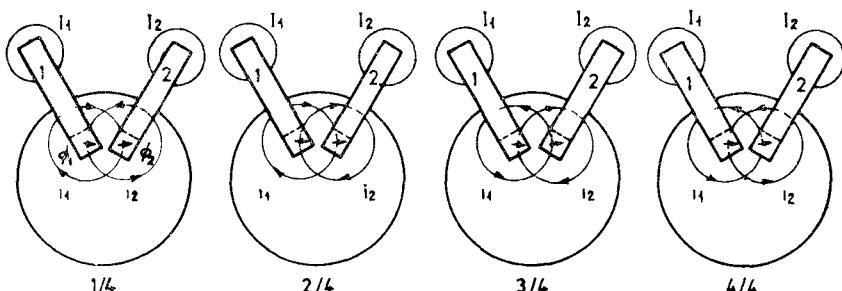


Figura VII-8.

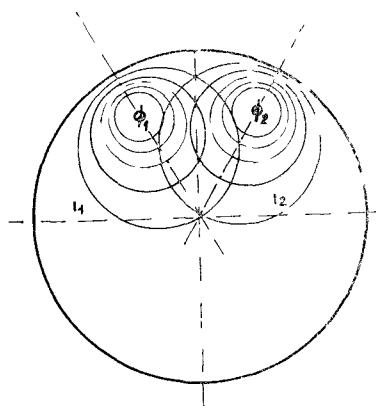


Figura VII-9.

rior, los dos flujos al atravesar el disco inducen en él las fuerzas electromotrices e_1 y e_2 , con sus resultantes corrientes de Foucault i_1 e i_2 , que circulan en trayectorias concéntricas con los polos de los respectivos electroimanes 1 y 2, figura VII-9.

Conviniendo que los flujos ϕ_1 y ϕ_2 están desfasados en el tiempo a 90° , consideramos las condiciones eléctricas del disco durante un ciclo completo de 360° , en cuatro etapas de 90° cada una. Como ya se ha mencionado, un sector de la trayectoria de las corrientes de Foucault i_1 (inducidas por el flujo ϕ_1), pasa por debajo del polo del electroimán 2 y un sector de la trayectoria de las corrientes i_2 (inducidas por el flujo ϕ_2) pasa por debajo del electroimán 1. Las dos fuerzas actúan sobre el disco siempre en un mismo sentido (ver fig. VIII-8, flechas sentido izquierda-derecha). El sentido señalado en la figura corresponde al caso cuando el flujo ϕ_1 está adelantado con respecto al flujo ϕ_2 . El sentido se invierte cuando cambia la secuencia de los flujos.

Momento motor

Cada fuerza es proporcional al producto del flujo por la corriente. Cuando la parte móvil tiene la forma de un disco y puede girar sobre un eje central, las fuerzas originarán una rotación continua, la cual se utiliza en medidores de energía de corriente alterna (3.^{er} tomo, Potencia y Energía).

Utilizando un resorte en espiral que origine un momento antagonista, el desplazamiento máximo del disco será inferior a una revolución. El momento motor de valor máximo se obtiene cuando los dos flujos ϕ_1 y ϕ_2 están desfasados a 90° . Esta condición de desfase de 90° no tiene importancia en voltímetros y en amperímetros de inducción, pero es imprescindible en la construcción de vatímetros y de medidores de energía.

Obsérvese en la figura VII-10 el diagrama vectorial del sistema de dos flujos. En el diagrama se ve que los flujos ϕ_1 y ϕ_2 están en fase con sus respectivas corrientes I_1 e I_2 . La fem e_1 inducida en el disco por el flujo ϕ_1 está desfasada a 90° con respecto a este flujo. Lo mismo sucede con la fem e_2 con respecto a ϕ_2 .

Las dos fuerzas F_1 y F_2 que actúan sobre el disco se pueden expresar por

$$F_1 = k_1 \cdot \phi_1 \cdot i_2 \cdot \cos \gamma_2$$

$$F_2 = k_2 \cdot \phi_2 \cdot i_1 \cdot \cos \gamma_1$$

donde k_1 y k_2 son constantes de proporcionalidad.

γ_1 es el ángulo entre el vector del flujo ϕ_1 y el vector de la corriente de Foucault i_2 .

γ_2 es el ángulo entre el vector del flujo ϕ_2 y el vector de la corriente de Foucault i_1 .

Del diagrama surge que $\gamma_1 = 90^\circ - \psi + \alpha_1$ y $\gamma_2 = 90^\circ + \psi + \alpha_2$.

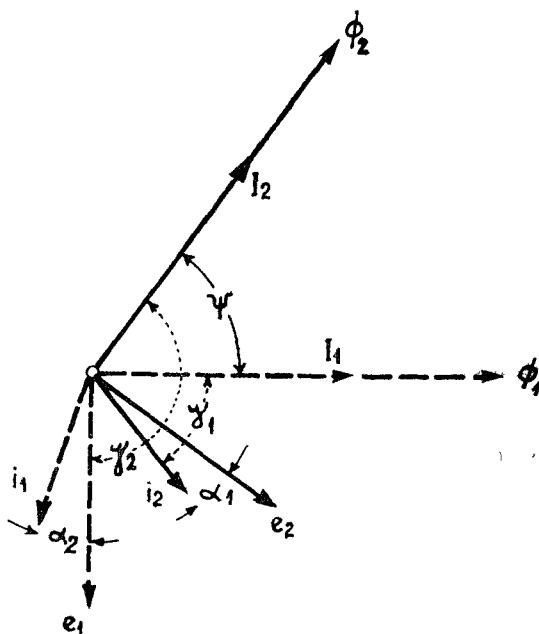


Figura VII-10.

Sustituyendo en las ecuaciones de fuerzas los valores γ_1 y γ_2 obtenemos

$$F_1 = -k_1 \cdot \phi_1 \cdot i_2 \cdot \sin(\psi + \alpha_2) \quad \text{y} \quad F_2 = k_2 \cdot \phi_2 \cdot i_1 \cdot \sin(\psi + \alpha_1)$$

Por ser α_1 y α_2 muy pequeños, resulta que las fuerzas F_1 y F_2 son proporcionales a $\sin \psi$. En consecuencia, el momento motor será:

$$M_m = (k_1 \cdot \phi_1 \cdot i_2 + k_2 \cdot \phi_2 \cdot i_1) \sin \psi$$

Debido a que las corrientes de Foucault originadas en el disco tienen sentido contrario entre sí, cambiamos el signo de la fuerza F_1 .

Las corrientes i_1 e i_2 están relacionadas con los flujos ϕ_1 y ϕ_2 por las fuerzas electromotrices correspondientes:

$$e_1 = C_1 \cdot \phi_1 \cdot f \quad \text{y} \quad e_2 = C_2 \cdot \phi_2 \cdot f$$

$$i_1 = \frac{e_1}{z_1} = -\frac{\phi_1 \cdot f}{z_1} \quad \text{e} \quad i_2 = \frac{e_2}{z_2} = -\frac{\phi_2 \cdot f}{z_2}$$

donde z_1 y z_2 son las impedancias en las trayectorias de las corrientes Foucault i_1 e i_2 . Cuando los ángulos α_1 y α_2 son iguales a cero: $z_1 = R_1$ y $z_2 = R_2$, e $i_1 = k_1' \cdot \phi_1 \cdot f$ e $i_2 = k_2' \cdot \phi_2 \cdot f$.

$$M_m = (k_1'' \cdot \phi_1 \cdot \phi_2 \cdot f + k_2'' \cdot \phi_1 \cdot \phi_2 \cdot f) \operatorname{sen} \psi = K \cdot \phi_1 \cdot \phi_2 \cdot f \cdot \operatorname{sen} \psi$$

Los flujos magnéticos ϕ_1 y ϕ_2 son proporcionales a las correspondientes corrientes magnetizantes I_1 e I_2 . La desviación α de la parte móvil es proporcional al momento motor M_m . En consecuencia, la desviación de la parte móvil puede ser expresada

$$\alpha = C \cdot f \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \operatorname{sen} \psi$$

La desviación de la parte móvil es proporcional a la frecuencia y al producto de las intensidades de corriente en las bobinas magnetizantes. Además, es proporcional al seno del ángulo entre vectores de flujos.

Asumiendo que en amperímetros ambos flujos magnéticos son proporcionales a la intensidad de corriente que se mide, tenemos:

$$M = C \cdot f \cdot I^2 \cdot \operatorname{sen} \psi$$

y cuando la frecuencia es constante

$$M = C' \cdot I^2$$

Lo mismo tenemos en voltímetros en los cuales $I_v = \frac{U}{Z}$

$$M = C'' \cdot U^2$$

De ello se deduce que las escalas de los voltímetros y de los amperímetros son similares a las cuadráticas. También de estas consideraciones resulta que el instrumento de inducción acusará correctamente con una frecuencia constante. Además, de constante, debe ser del mismo valor que la frecuencia con la cual el instrumento ha sido contrastado previamente.

Existen instrumentos de inducción cuya parte móvil tiene forma de tambor. Esta variante de la parte móvil es muy utilizada en la construcción de vatímetros. La figura VII-11 muestra esquemáticamente la construcción de este tipo de instrumentos. El circuito magnético está formado por un yugo (1) con los cuatro polos (2) y con un núcleo central (3). En el entrehierro está colocado un tambor de aluminio (4) que gira sobre el eje central y que está provisto de una espiral que da origen al momento antagonista. El circuito magnético está confecionado con chapa magnética laminada. Los arrollamientos (5 y 6) de los polos opuestos están conectados en serie y cada par de estos polos genera un flujo magnético desfasado entre sí 90° (ϕ_1 , ϕ_2). Cuando ambos arrollamientos están alimentados con las corrientes

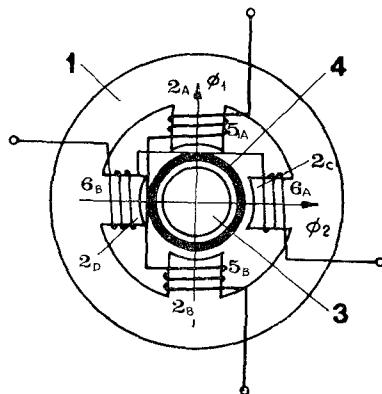


Figura VII-11.

I_1 e I_2 desfasadas entre sí en el tiempo, en el tambor se generan corrientes de Foucault también desfasadas. La acción mutua de los flujos desfasados en el espacio y en el tiempo, y de las corrientes de Foucault da origen al momento motor (M_m). La figura VII-12 muestra el esquema de conexión de un vatímetro de inducción. El arrollamiento de intensidad (5), dividido en dos secciones, está colocado sobre dos polos opuestos 2 A y 2 B. El arrollamiento de tensión (6) está colocado sobre los otros dos polos (2 C y 2 D). En paralelo al arrollamiento de tensión (6) está conectada una resistencia no inductiva (R) y en serie en el circuito de tensión está intercalada una reactancia (L). El diagrama vectorial del sistema se representa en la figura VII-13.

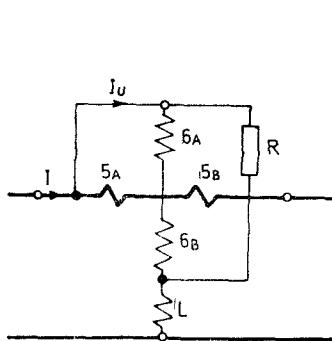


Figura VII-12.

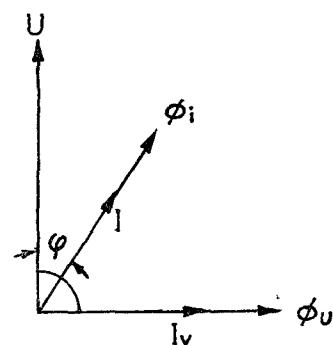


Figura VII-13.

El momento motor se puede expresar por

$$M_m = C \cdot f \cdot \phi_1 \cdot \phi_2 \cdot \sin(\phi_1 \wedge \phi_2)$$

donde ϕ_1 y ϕ_2 son los flujos magnéticos de los arrollamientos de intensidad y de tensión respectivamente. Por tanto

$$\phi_i = \phi_1 = k_i \cdot I_i \quad \text{y} \quad \phi_u = \phi_2 = k_u \cdot I_u$$

Se puede asumir, debido a que la resistencia inductiva del circuito de tensión es muchísimo mayor que la resistencia óhmica que

$$Z_u \approx 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_u \quad (2 \cdot \pi \cdot f = \omega)$$

y por lo tanto

$$\phi_u = k_u \cdot I_u = k_u \cdot \frac{U}{Z_u} = k_u \cdot \frac{U}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_u}$$

Valiéndonos de la ecuación básica y sustituyendo tenemos:

$$M_m = C \cdot f \cdot k_i \cdot I_i \cdot k_u \cdot \frac{U}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_u} \cdot \sin(\phi_i \wedge \phi_u) = C_1 \cdot I \cdot U \cdot \sin(\phi_i \wedge \phi_u)$$

Para que el momento motor sea proporcional a la potencia que se mide, debe cumplirse la condición expresada por la ecuación:

$$\sin(\phi_i \wedge \phi_u) = \cos \varphi$$

Del diagrama vectorial surge que esta condición se cumple cuando la corriente I_u en el arrollamiento de tensión (2 CD) se atrasa en 90° con respecto a la tensión suministrada.

Capítulo VIII

INSTRUMENTOS ELECTROSTATICOS

Generalidades

El sistema electrostático está constituido por un condensador de capacidad variable. El momento motor originado en el sistema depende de la diferencia de potenciales aplicada a los electrodos del condensador. El sistema trabaja en base a la ley de Coulomb

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{\varepsilon \cdot r^2}$$

donde

F es la fuerza que se produce entre dos cargas

q_1 y q_2 son las cargas sobre los electrodos

r es la distancia entre los electrodos

ε es la constante dieléctrica del material aislante entre los electrodos. (En condiciones del vacío o en presencia del aire $\varepsilon = 1$.)

La fuerza F actuará como fuerza de repulsión o de atracción según que las cargas sean de igual signo o de signo opuesto. Uno de los electrodos del condensador conforma la parte móvil y el otro la parte fija. Debido al incremento de la capacidad del condensador, la parte móvil tiende a estabilizarse en la posición en la que la energía eléctrica del campo es máxima.

Los instrumentos electrostáticos son instrumentos de potencia y se construyen en base a dos sistemas:

1. El cambio de capacidad se produce debido a la modificación de la distancia entre los electrodos.

2. El cambio de capacidad se produce debido a cambios de la superficie activa de los electrodos.

La figura VIII-1 muestra un voltímetro electrostático de Hartmann & Braun, cuya construcción está basada sobre el sistema mencionado en el punto 1. El sistema se compone de dos placas verticales (3) y (4), entre las cuales está suspendida la placa móvil (1). La placa fija (3) está conectada con la placa móvil (1) de tal manera que

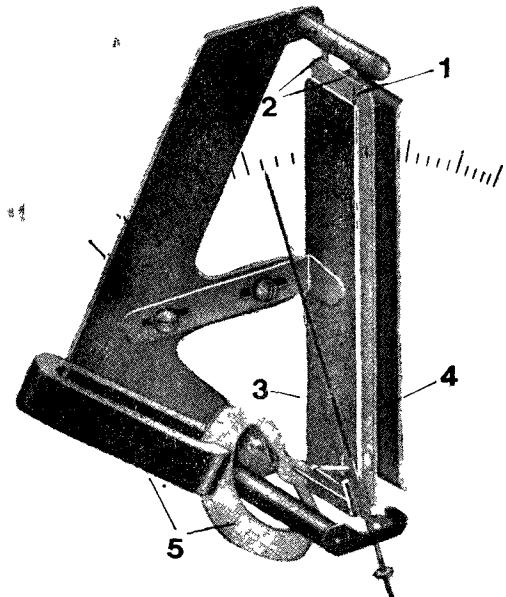


Figura VIII-1.

ambas placas tienen el mismo potencial. La placa móvil (1) está suspendida sobre dos cintas elásticas (2) y ambas dan origen al momento antagonista M_a . Conectando al juego de placas la tensión que se va a medir, la placa móvil (1) y la placa fija (3) tendrán el mismo potencial debido a la conexión entre ambas; en cambio, la placa fija (4) tendrá potencial diferente. Como consecuencia de esta diferencia de potenciales, la placa (1) será rechazada por la placa fija (3) y atraída por la placa fija (4). El desplazamiento del electrodo móvil se transmite a la aguja indicadora que recorre la escala. Las oscilaciones de la parte móvil se amortiguan con un amortiguador que puede ser neumático o electromagnético (ver capítulo IX).

La figura VIII-2 muestra un voltímetro del tipo denominado "multicelular". En este tipo de voltímetro la parte fija está compuesta por cámaras metálicas (1) y la parte móvil está constituida por igual can-

tidad de agujas de aluminio (2) montadas sobre un eje (3). El conjunto de agujas se desplaza con un movimiento giratorio dentro de las cámaras formadas por placas (4) similares a las de un condensador variable. El movimiento de las agujas dentro de las cámaras produce la variación de la capacidad del condensador formado por el conjunto de placas y agujas. La parte móvil está suspendida sobre una cinta elástica (5) que origina el momento antagonista M_a . El movimiento de la

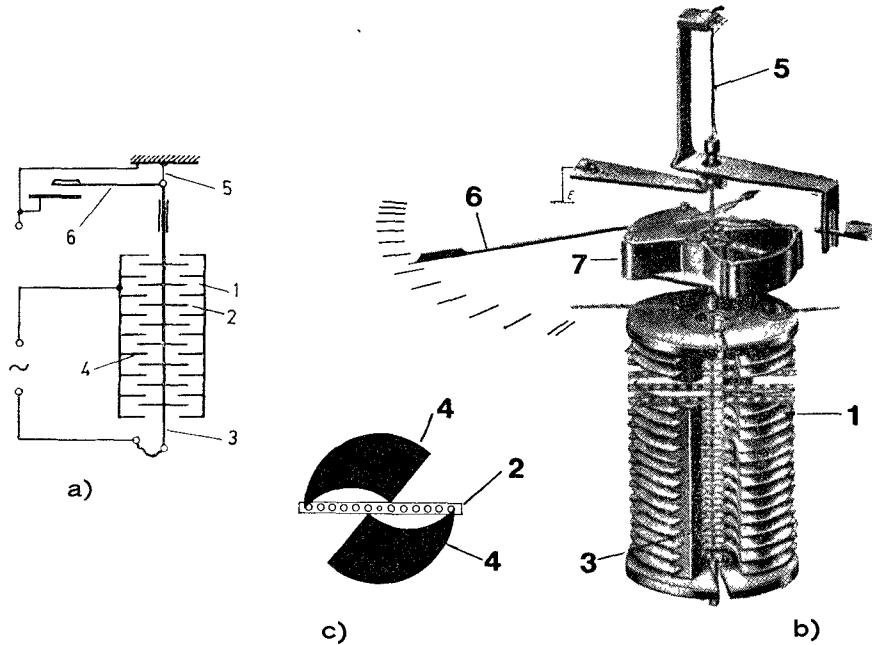


Figura VIII-2.

parte móvil se transmite a la aguja indicadora (6), la cual se desplaza sobre la correspondiente escala. Para obtener una escala más uniforme se requiere que las placas (4) tengan una determinada forma tal como se ve en la figura VIII-2c.

La característica principal del voltímetro electrostático es su altísima resistencia (del orden de millón de megohmios) para corriente continua. En corriente alterna la impedancia en frecuencias bajas es también de orden muy elevado, pero, a medida que aumenta la frecuencia, el valor de la impedancia disminuye considerablemente. Por tanto, no se recomienda utilizar este tipo de voltímetro en corriente alterna de altas frecuencias.

El valor de la capacidad aumenta con la desviación de la parte móvil. Por ejemplo, en un voltímetro de alcance 0 - 75 V, la capacidad varía desde $20 \mu\text{F}$ en la posición 0 hasta $170 \mu\text{F}$ en la posición correspondiente a la desviación máxima, o sea 75 V.

Momento motor

Utilizaremos el esquema de la figura VIII-3 para deducir la fórmula del momento motor M_m . La desviación de la parte móvil correspondiente a la tensión medida U se produce por la atracción de los electrodos del condensador, 1 y 2. El electrodo 1 es fijo y el electrodo 2 es móvil. Al estar conectado el instrumento a la tensión, el elec-

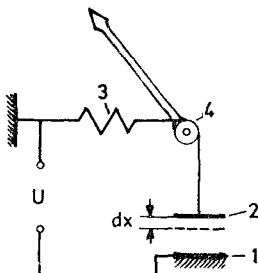


Figura VIII-3.

trodo móvil se estabiliza en la posición en la cual el momento motor M_m es igual al momento antagonista M_a . Este momento se origina en el resorte 3, que mediante un cable flexible y la polea 4 transmite su fuerza al electrodo móvil 2. Al conectar la tensión U al condensador, el electrodo 2 será atraído hacia el electrodo 1 con la fuerza F a lo largo de la distancia dx . El incremento de la energía necesaria para el trabajo mecánico es

$$dA_m = F dx$$

El movimiento circular de la parte móvil producido por el aumento de energía depende del momento motor y del ángulo de desviación α

$$dA_m = M_m d\alpha$$

El aumento de energía del campo eléctrico, por aumento de capacidad, será:

$$dA_e = d \left(\frac{C \cdot U^2}{2} \right) = \frac{U^2}{2} dC$$

El aumento necesario de energía para dar lugar a un incremento del ángulo de desviación de la parte móvil (electrodo 2) por $d\alpha$, será:

$$dA = dA_m + dA_e = M_m d\alpha + \frac{U^2}{2} dC$$

Este aumento total de energía se puede calcular partiendo de la cantidad de energía consumida por el sistema

$$\Delta A = d(QU) = d(CU^2) = U^2 dC$$

La energía consumida por el sistema es igual al total de la energía necesaria para el movimiento de la parte móvil

$$Md\alpha + \frac{U^2}{2} dC = U^2 dC \quad ; \quad M_m d\alpha = \frac{1}{2} U^2 dC$$

El incremento de la energía mecánica dA_m consumida durante el movimiento de la parte móvil es igual al incremento de la energía dA_e del campo eléctrico del condensador

$$M_m = \frac{1}{2d\alpha} U^2 dC = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{d\alpha}$$

La aguja indicadora se estabiliza en una posición en la cual el momento motor es igual al momento antagonista originado por el resorte

$$M_m = M_a \\ k_a \alpha = \frac{U^2}{2} \frac{dC}{d\alpha} \quad y \quad \alpha = \frac{1}{2k_a} \frac{dC}{d\alpha}$$

La desviación de la aguja indicadora es proporcional al cuadrado de la tensión y a la derivada de la capacidad con respecto al ángulo de desviación.

$$\text{Cuando } \frac{dC}{d\alpha} = \text{const.} \quad \alpha = k \cdot U^2$$

y la escala es cuadrática. Un ejemplo de este tipo de escala lo muestra la figura VIII-4.

La desviación de la parte móvil del voltímetro electrostático es función del valor eficaz de la tensión. La forma de la onda no influye en la desviación; las indicaciones del instrumento serán las mismas, sea en corriente continua o alterna. Esto se explica en que el

momento instantáneo es proporcional al producto de cargas ubicadas sobre las placas fija y móvil, y como ambas cargas son iguales, el momento motor es proporcional al cuadrado de la carga de una de las placas. Las cargas son proporcionales a la tensión aplicada. Por tanto, el momento motor es proporcional al cuadrado de la tensión y la escala será cuadrática (fig. VIII-4). Dando una forma especial a los electrodos (fig. VIII-2c) se obtendría mayor uniformidad de la escala.

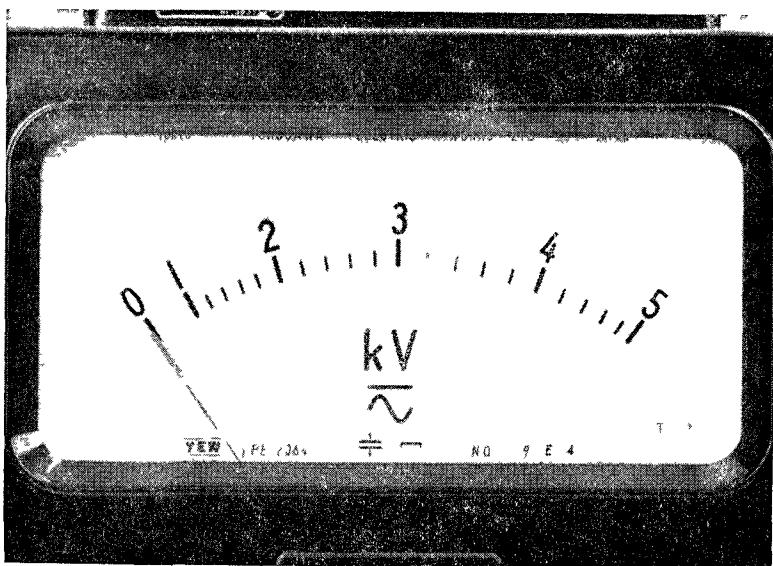


Figura VIII-4.

Voltímetro electrostático

El sistema electrostático es un sistema voltmétrico y, por tanto, su única aplicación es en la construcción de voltímetros. La potencia que requiere el voltímetro electrostático es muy pequeña y ésta cubre únicamente las pérdidas en el dieléctrico del condensador variable. Cuando se lo emplea en mediciones de corriente continua, la potencia consumida tiene un valor insignificante; en corriente alterna depende esta potencia de la frecuencia. El mínimo consumo del voltímetro electrostático hace que su uso resulte muy conveniente en mediciones de tensiones altas y en circuitos de muy pequeñas potencias.

La ampliación de la escala de un voltímetro electrostático se consigue de tres modos:

1. Conectando en serie un condensador adicional de capacidad C_{ad} (figura VIII-5), con el voltímetro de capacidad C_v .
2. Empleando un divisor de tensión capacitivo, compuesto de dos condensadores parciales C_1 y C_2 , figura VIII-6.
3. Utilizando un divisor de tensión resistivo compuesto de las resistencias parciales R_1 y R_2 , figura VIII-7.

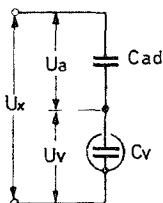


Figura VIII-5.

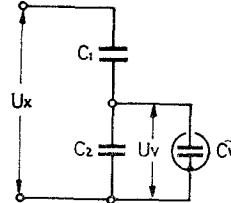


Figura VIII-6.

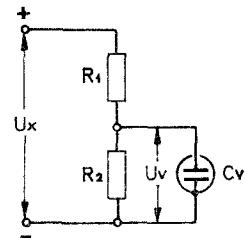


Figura VIII-7.

En el primer caso, la relación entre las tensiones U_a y U_v depende de la relación entre las impedancias del condensador adicional y la del voltímetro. Como es sabido, el valor de la resistencia del material aislante (dieléctrico entre electrodos) no es constante, sino que depende del valor de la tensión de c.c. aplicada. En consecuencia, para mediciones de c.c. no se puede utilizar el voltímetro electrostático conectado en serie con un condensador adicional.

El segundo sistema de ampliación de la escala (fig. VIII-6) consiste en el uso de un divisor capacitivo. Los condensadores parciales C_1 y C_2 del divisor deben tener una capacidad mucho mayor que la del voltímetro para disminuir la influencia de la variación de la capacidad del voltímetro, debida a la desviación de su parte móvil, sobre la división de tensión entre los condensadores. Cuando $C_v \ll C_2$, la tensión que actúa sobre el voltímetro se expresa por

$$U_v = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot U_x$$

Los errores de medición con este sistema son del orden de 2 %.

El tercer sistema de ampliación de escala, del voltímetro electrostático, se utiliza en mediciones de c.c. El divisor de tensión, figura VIII-7, es de tipo resistivo; la tensión que actúa sobre el voltímetro es

$$U_v = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_x$$

La figura VIII-8 muestra un ejemplo de un voltímetro electrostático portátil para el uso en laboratorios. El instrumento está fabricado por la industria polaca marca Metronex - Era, Mod. PS-1. El voltímetro está diseñado y calibrado para mediciones de tensiones de corriente continua y de corriente alterna en bajas y altas frecuencias. Como ya se ha mencionado, este tipo de voltímetro no tiene consumo de energía en corriente continua y, en corriente alterna, su consumo es

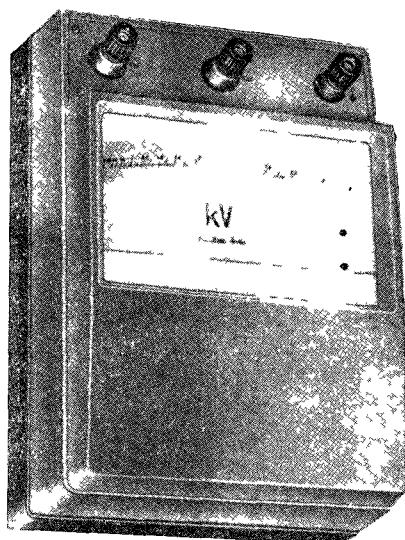


Figura VIII-8.

Nº de Catálogo	Margen eficaz V	Margen de indicación V	Capacidad de entrada en los terminales con deflexión de plena escala (aprox.) pF	Límite aprox. de frecuencia MHz	Tensión de prueba de aislamiento V
P-93-02	30 ... 150	0 ... 150	31	2	2000
P-93-03	60 ... 300	0 ... 300	30	2	2000
P-93-04	100 ... 600	0 ... 600	22	1,5	2000
P-93-05	300 ... 1500	0 ... 1500	20	1	5000
P-93-06	600 ... 3000	0 ... 3000	20	0,5	7000

muy reducido. Su clase de exactitud es de 0,5 %. Las características operacionales de cinco modelos de este voltímetro figuran en la tabla de la página anterior.

El sistema consiste en dos juegos de electrodos planos. La distancia entre los electrodos es fija y depende del margen de medición; la superficie activa varía según la desviación. La suspensión de la parte móvil es de cinta elástica de modo que el momento de fricción está eliminado. El sistema indicador es de espejo que proyecta la señal luminosa sobre una escala transparente mediante el sistema óptico similar al de la figura III-28. La longitud total del rayo de luz es de



Figura VIII-9.

385 mm. Para el funcionamiento del sistema óptico se utiliza 6,5 V que vienen de un pequeño transformador. El instrumento está provisto de 3 horas de conexión: el borne central y el borne derecho se utilizan para conectar a la corriente continua y a la alterna de frecuencias bajas (15 a 60 Hz). Para mediciones en frecuencias altas se conecta el voltímetro utilizando los bornes izquierdo y derecho. La figura VIII-9 muestra el tipo de escala que es de 150 mm de longitud.

Capítulo IX

INSTRUMENTOS ELECTROTERMICOS

Generalidades

El sistema electrotérmico funciona en base a la conversión de la potencia calorífica, producida por la corriente que circula por el *calentador*, en potencia mecánica, la cual origina el desplazamiento de la aguja indicadora. Este desplazamiento se obtiene aprovechando la deformación (dilatación, curvatura) de un elemento metálico, debida al calor producido por la corriente que se mide.

El calentador recibe una potencia eléctrica (P) y la convierte en potencia calorífica (I^2R).

$$P = I^2 \cdot R$$

donde

I es la corriente que circula y que se mide

R es la resistencia eléctrica del sistema.

Una parte de la potencia recibida es consumida por el calentador y el resto se disipa por conducción, convección y radiación. La temperatura del sistema se estabiliza cuando la potencia recibida se iguale con la potencia disipada, o sea, cuando

$$P_1 = k \cdot S \cdot (t_c - t_a) \quad (\text{fórmula de Newton})$$

donde

k es el coeficiente de proporcionalidad ($\text{W/cm}^2 \text{ }^\circ\text{C}$)

S es la superficie del conductor caliente (cm^2)

t_c es la temperatura del calentador

t_a es la temperatura de ambiente

Cuando la temperatura se estabilice, o sea, cuando la potencia disipada se iguale a la potencia suministrada al calentador tenemos

$$P = P_1$$

sustituyendo,

$$I^2 \cdot R = k \cdot S(t_c - t_a) \quad \text{y de esto} \quad t_c - t_a = \frac{I^2 \cdot R}{k \cdot S}$$

Debido al incremento de la temperatura el alambre calentador de longitud "l" se dilata Δl .

$\Delta l = l \cdot \alpha (t_c - t_a)$; donde α es el coeficiente de dilatación longitudinal del material resistivo. Sustituyendo tenemos:

$$\Delta l = l \cdot \alpha \cdot \frac{I^2 \cdot R}{k \cdot S}$$

Asumiendo que la longitud l y los coeficientes k y α son, dentro de ciertos límites de temperatura, constantes, se puede expresar

$$\Delta l = C \cdot I^2$$

La dilatación del alambre calentador es pues proporcional al cuadrado de la corriente.

Los instrumentos electrotérmicos se construyen según dos sistemas. El primer sistema, casi en desuso, es el denominado "de hilo caliente" y el otro, bimetálico, se emplea para fines especiales.

Las figuras IX-1 y IX-2 muestran el funcionamiento del sistema de hilo caliente. En este sistema el alambre calentador está confec-

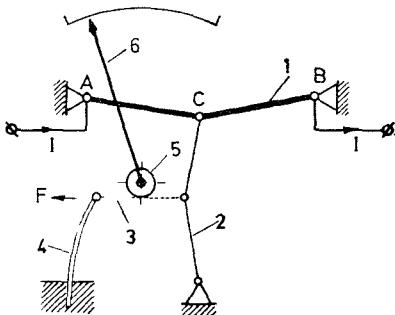


Figura IX-1.

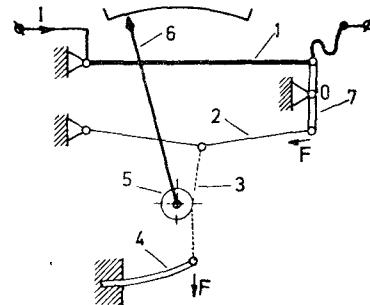


Figura IX-2.

cionado de una aleación especial. Esta aleación puede ser el platino con plata, platino con iridio, acero al níquel o manganina. El diámetro del alambre calentador oscila entre 0,03 y 0,2 mm. Con el fin de que el alambre no pierda sus propiedades elásticas, la temperatura no ha de sobrepasar los 200 °C.

En la figura IX-1 el alambre canlentador (1) está fijado entre dos puntos A y B. En el punto C del alambre (1) está enlazado un alambre (2) que actúa como puente. Un resorte o una lámina elástica (4) estira el puente y el alambre calentado mediante un hilo de seda (3) enroscado en la polea (5). La aguja indicadora (6) está fijada al eje de la polea. Al circular la corriente I (medida) a través del calentador (1) éste se dilata y por su alargamiento permite que la lámina (4), tirando de hilo de seda (3) gire la polea (5) y, en consecuencia, desplace la aguja indicadora sobre la escala. El sistema de la figura IX-2 difiere del anterior en la suspensión del alambre calentador (1). En este sistema el extremo A es fijo y el extremo B está conectado a un brazo de la palanca (7). Al otro brazo de la palanca está conectado el puente (2). Al circular la corriente a través del alambre (1), éste se dilata y por su alargamiento permite que la palanca (7) gire sobre el eje 0. De esta manera, se afloja el puente (2) y la lámina (4) origina el desplazamiento de la aguja indicadora (6) de igual modo que en el caso anterior. La ventaja de esta variante radica en el mantenimiento del alambre (1) siempre estirado.

Momento motor

A diferencia de otros sistemas motor, el momento que origina el desplazamiento de la aguja indicadora, no está producido por la corriente que circula, sino por la energía potencial del resorte (o de la lámina elástica). Este resorte está cargado de tal manera que la aguja (en estado sin corriente) permanece en la posición cero de la escala. Al circular la corriente (que se mide) por el alambre calentador, la energía eléctrica equivalente a I^2R produce su dilatación y el alargamiento libera la energía potencial acumulada en el resorte. El momento antagonista se origina debido a la elasticidad del alambre calentado. Como ya se ha mencionado, el alambre no debe trabajar en temperaturas elevadas para no sobrepasar los límites de elasticidad. A medida que aumenta la desviación, disminuye el momento motor debido al acercamiento del resorte a su posición sin carga.

Como ya se ha mencionado, la dilatación del alambre calentador es proporcional al cuadrado de la corriente. En consecuencia, el desplazamiento de la aguja indicadora producido por la dilatación del alambre calentador, es también proporcional al cuadrado de la corriente, y la escala del instrumento tiene característica de cuadrática. La figura IX-3 muestra un ejemplo de la escala de un amperímetro de hilo caliente.

El sistema electrotérmico se utiliza para instrumentos de corriente continua y alterna indistintamente. En corriente alterna acusa valores eficaces. Su particularidad más importante es que su funcionamiento

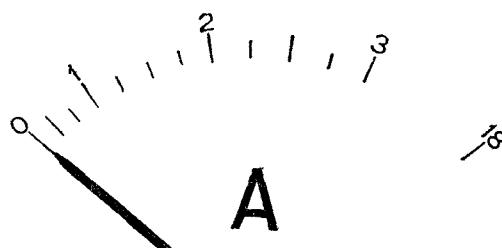


Figura IX-3.

no depende de la frecuencia. Debido a esto, se lo utiliza principalmente en calidad de amperímetro de antena.

El sistema bimetálico está basado en empleo del bimetal para producir el desplazamiento de la aguja indicadora. Como es sabido, un bimetal consiste en dos láminas metálicas de distinto coeficiente de dilatación, unidas entre sí en todo su largo para formar una lámina plana o helicoidal. Al aumentar la temperatura del conjunto, la lámina de mayor coeficiente de dilatación se alarga más que la lámina cuyo coeficiente de dilatación es inferior. En consecuencia, el bimetal se dobla hacia el lado del material que tiene el menor coeficiente de dilatación. El movimiento originado por la curvatura del bimetal se transmite al índice del instrumento. Utilizando la corriente que se quiere medir como agente calentador del bimetal se obtiene un sistema bimetálico de medición. Existen dos variantes que se utilizan en sistemas bimétalicos de instrumentos de medición:

1. Bimetal de calentamiento directo.
2. Bimental de calentamiento indirecto.

El primero, o sea, el sistema de calentamiento directo del bimetal, se presta para la construcción de amperímetros. La figura IX-4 ilustra el sistema. La espiral bimetálica (2), fija en uno de sus extremos, está unida al eje (1) por el otro extremo. La corriente a medir circula por la espiral bimetálica, la cual al calentarse se dilata en función de su temperatura. La dilatación de la espiral origina el movimiento del eje (1) con su aguja indicadora (3). Debido a la capacidad térmica del bimetal, estos sistemas reaccionan lentamente a la corriente que circula, tardando varios minutos (8 a 15) en alcanzar los valores correctos. Por esta razón el instrumento indica un valor promedio de la corriente eficaz. Este sistema se utiliza en lugar de instrumentos registradores de valores máximos alcanzados en un determinado periodo de tiempo. La figura IX-6 muestra el cuadrante de un amperímetro triple de este tipo. Cada uno de los tres amperímetros bimétalicos está

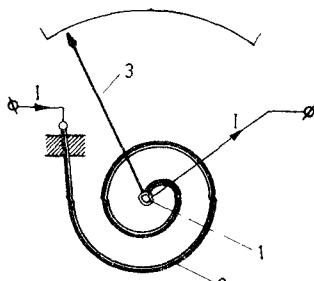


Figura IX-4

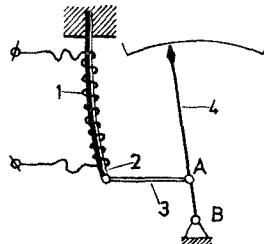


Figura IX-5

provisto de una aguja adicional (1) que puede ser arrastrada por la aguja indicadora (2), quedando luego en la posición del valor máximo indicado. El botón (3) permite la reubicación de la aguja (1) en cero. El instrumento de la figura pertenece a un amperímetro de control de carga máxima por fase.

La figura IX-5, muestra la construcción de un voltímetro basado sobre el calentamiento indirecto del bimetal. El arrollamiento calentador (1), de alto valor resistivo (R_1) ha sido bobinado sobre la lámina

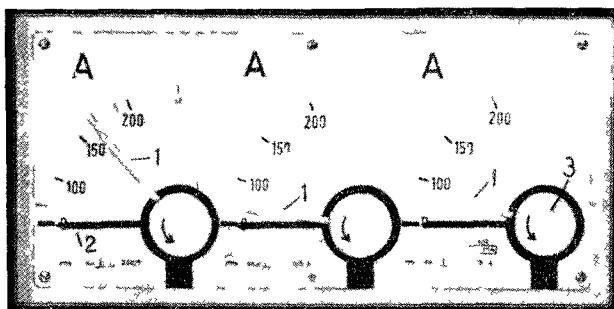


Figura IX-6.

bimetálica (2). Este arrollamiento, por lo general, conectado en serie con una resistencia adicional (R_a), se conecta a la tensión cuyo valor se va a medir. El calor producido por el arrollamiento calentador (1), proporcional a I^2 ($I = \frac{U}{R_1 + R_a}$), calienta la lámina bimetálica (2) la cual se curva debido a los diferentes coeficientes de dilatación de sus metales componentes. El desplazamiento del extremo de la lámina se transmite mediante la unión (3) a la aguja indicadora (4) la cual acusa la tensión medida.

Capítulo X

GALVANOMETROS

En el año 1830, el físico francés Ampère bautizó con el nombre “galvanómetro” a un instrumento que utilizaba para medir “la corriente galvánica”. Hoy, se da el nombre de galvanómetro a todos los instrumentos de extrema sensibilidad que carecen de sistema transductor, sea cual fuere su sistema motor. No habiendo sistema transductor el instrumento consiste en un sistema indicador únicamente y, por tanto, su escala está graduada en unidades de longitud (cm, mm y fracciones), en vez de unidades de magnitudes eléctricas.

Los galvanómetros pueden ser magnetoeléctricos de bobina móvil, magnetoeléctricos de imán móvil, electromagnéticos, electrodinámicos y electrostáticos. El galvanómetro magnetoeléctrico es de uso más frecuente y tiene diversas aplicaciones. Por esta razón, este capítulo se dedica a este tipo de galvanómetros.

Las mediciones que requieren el uso de galvanómetro pueden ordenarse en tres grandes grupos:

a. Métodos de cero (puentes), en los cuales se utiliza el galvanómetro como “detector de cero”. En estos casos el galvanómetro debe señalar el mínimo rastro de corriente en una parte del circuito.

b. Métodos de comparación en los cuales se compara los valores numéricos de dos o más desviaciones de galvanómetro, sin tener importancia las unidades de medidas eléctricas.

c. Mediciones de intensidades y tensiones extremadamente bajas. Para estos casos el galvanómetro se somete a una calibración previa y luego se lo utiliza como microamperímetro o microvoltímetro supersensible.

El galvanómetro magnetoeléctrico, cualquiera que sea su tipo, se asemeja en su construcción al sistema magnetoeléctrico de los instrumentos comunes. Consiste en una bobina móvil, un imán permanente,

un núcleo central y un dispositivo indicador. Este último puede ser una aguja que recorre una escala o, más frecuentemente, se utiliza un haz de luz proyectado sobre una escala transparente. Si bien los elementos mencionados son los mismos en todos los tipos de galvanómetros magnetoeléctricos, sin embargo, cada tipo de galvanómetro presenta variaciones en la construcción de los mencionados elementos componentes. Los galvanómetros magnetoeléctricos se dividen en cuatro tipos principales de los cuales cada uno tiene aplicaciones diferentes. Estos cuatro tipos son los siguientes:

1. Galvanómetros comunes.
2. Galvanómetros balísticos.
3. Galvanómetros lentos (fluxómetros).
4. Galvanómetros de vibración o de resonancia.

La figura X-1 muestra esquemáticamente el funcionamiento y el uso del galvanómetro magnetoeléctrico de espejo. La bobina móvil (1) está suspendida mediante dos cintas metálicas finas, la superior (2) y

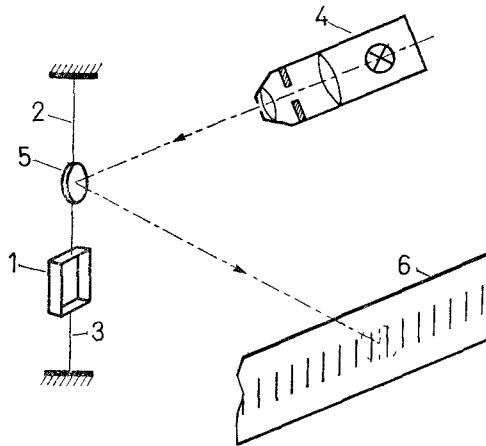


Figura X-1.

la inferior (3). Un sistema óptico (4) proyecta un haz de luz a un espejo cóncavo (5) fijado a la bobina móvil. El haz de luz reflejado en el espejo se proyecta a una escala transparente (6).

La figura X-2 aclara la desviación del punto luminoso producido por el haz de luz, sobre la escala transparente. Como es sabido, el án-

gulo α de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Por tanto, el ángulo entre el rayo incidente y el reflejado es 2α , deduciéndose que

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{a}{R}$$

donde

α es el ángulo de desviación de la bobina móvil,

R es la distancia del espejo a la escala.

a es la desviación del punto luminoso sobre la escala.

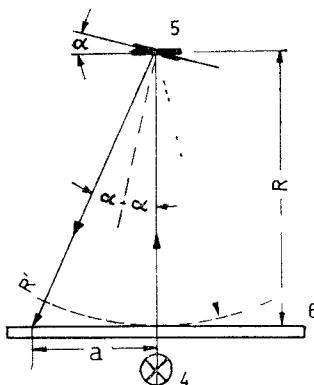


Figura X-2.

Cuando los ángulos son inferiores a 5° se acepta que $\operatorname{tg} 2\alpha = 2\alpha$ y por lo tanto

$$2\alpha = \frac{a}{R} \quad \text{y} \quad \alpha = \frac{a}{2R}$$

Cuando los ángulos $\alpha > 5^\circ$ se debe utilizar la fórmula exacta

$$\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{a}{R}$$

De la observación de la figura X-2 se puede deducir el error que se produce con desviaciones grandes; a medida que aumenta la desviación aumenta la diferencia entre la longitud del rayo reflejado R' y la distancia R entre el espejo y la escala. Este error, que tiene importancia cuando se utiliza el galvanómetro para medir tensiones o intensidades, se puede remediar utilizando una escala curva, o también calcu-

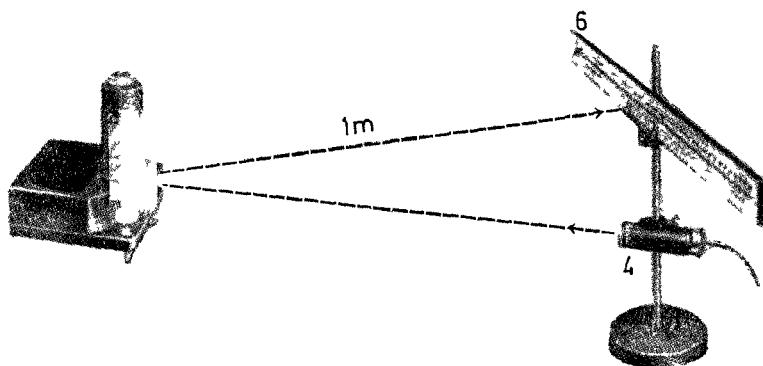


Figura X-3.

lando correcciones. Es obvio que cuando se utiliza el galvanómetro como detector de cero, el error no aparece.

Los galvanómetros con la escala colocada a la distancia de 1 m o más son de uso incómodo (fig. X-3); por lo general, requieren un montaje fijo, lo cual es sólo factible en laboratorios especiales con mucho espacio. Además son muy sensibles a las vibraciones que se transmiten por separado a la escala, al sistema óptico y al galvanómetro mismo. Sin embargo, presentan la ventaja de permitir variar su sensibilidad variando la distancia R entre la escala y el galvanómetro. Se prestan además para demostraciones prácticas en auditorios. La figura X-4 muestra un galvanómetro de este tipo de fabricación de la firma AOIP, de Francia. Su sensibilidad de corriente es de $0,03 \cdot 10^{-9}$ A/mm y de tensión es de $0,3 \cdot 10^{-3}$ V/mm de la escala distante a 1 m. Ambas sensibilidades pueden ser aumentadas alejando la escala a una distancia mayor de 1 m.

Resulta sumamente conveniente utilizar galvanómetros de una construcción lo más compacta posible, especialmente cuando se los emplea como detectores de cero. Para la construcción de galvanómetros de tamaño reducido se recurre a sistemas ópticos más complejos. Frecuentemente se utiliza un sistema de doble reflexión o/y amplificador óptico. La figura X-5 muestra una construcción de la firma Hartmann & Braun, Alemania; se puede apreciar un espejo plano, adicional (5a) que intercepta y refleja el haz de luz. Un sistema del tipo reproducido en la figura permite la construcción de galvanómetros de sensibilidad equivalente a una distancia de la escala al espejo de 1,5 m a pesar del tamaño reducido de la caja (25 cm).

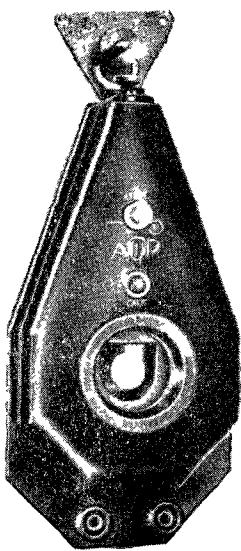


Figura X-4

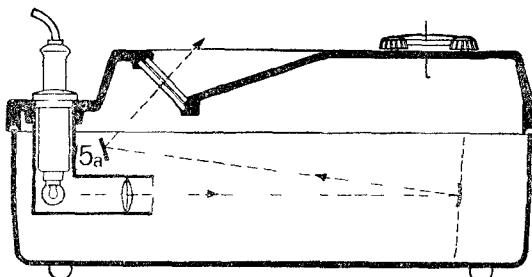
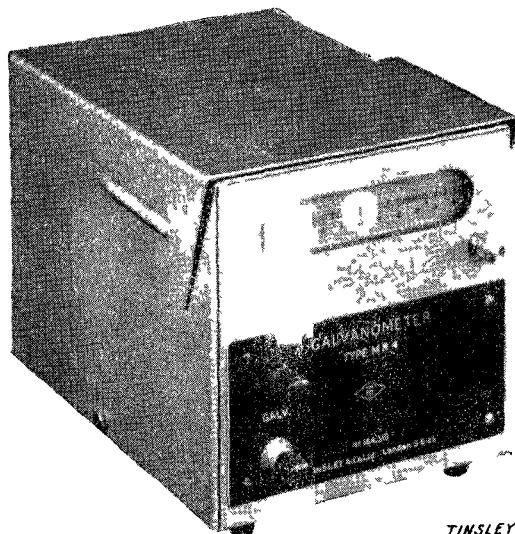


Figura X-5

Las figuras que siguen a continuación muestran varios galvanómetros de sistema óptico complejo que permite la reducción del tamaño del conjunto. La figura X-6 representa un galvanómetro de marca *Tinsley* (Inglaterra). Su caja tiene la longitud de 25 cm aproximadamente. En la figura X-7 se ve el montaje del conjunto dentro de la caja. El espejo del galvanómetro (1) recibe el rayo de luz proyectado por el sistema óptico (2), lo refleja hacia el espejo intermedio (3) y luego lo proyecta sobre la escala (4). La figura X-8 muestra la vista exterior del sistema magnetoeléctrico de este galvanómetro. Para disminuir los efectos de vibraciones que se sienten en la mayoría de los edificios, toda la suspensión está sumergida en un baño de aceite especial, lo que produce un excelente amortiguamiento. También permite pequeños desniveles en su posición lo que es importante para un instrumento portátil. A pesar de ser este galvanómetro de construcción muy compacta ($265 \times 153 \times 180$ mm), tiene la sensibilidad correspondiente a la distancia entre la escala y el espejo del galvanómetro igual a 1,5 m. El espejo sobre la parte móvil tiene forma cuadrada de $3,8 \times 3,8$ mm. Su período de oscilación libre es $T_0 = 2$ seg.

En las figuras X-9 y X-11 están representados dos galvanómetros de fabricación francesa (AOIP). El primero, muy cómodo para uso en



TINSLEY

Figura X-6.

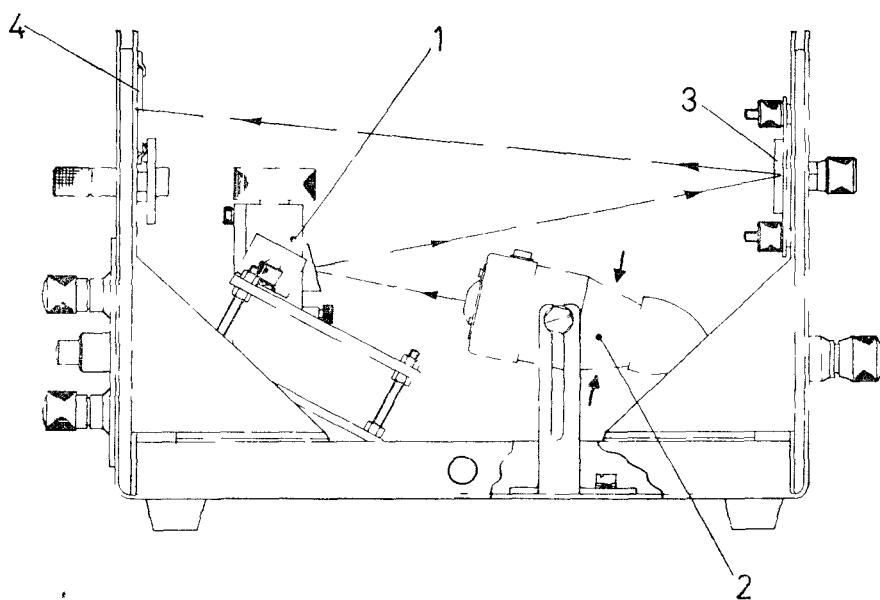


Figura X-7.

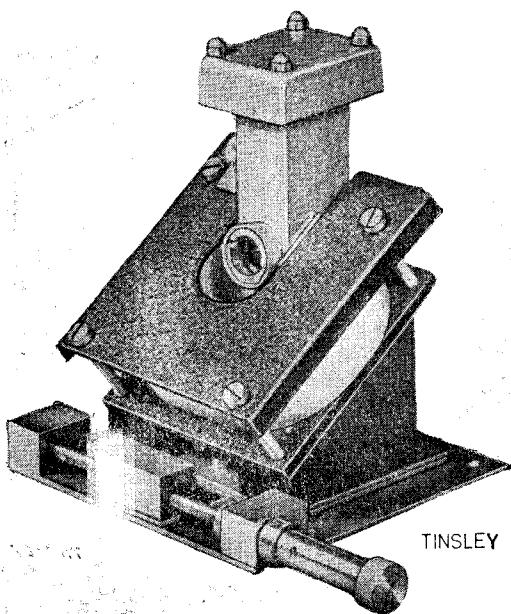


Figura X-8.

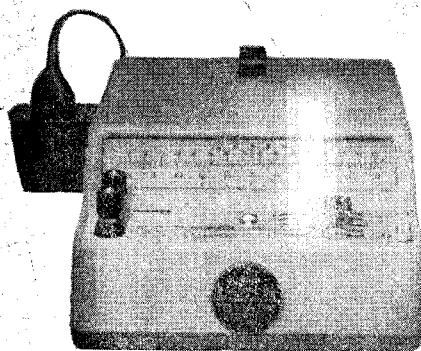


Figura X-9.

laboratorios, es de clase 1 de exactitud, su período de oscilación libre es de 2 seg. Su sistema óptico permite obtener desviaciones correspondientes a la distancia de la escala de 1 m en un instrumento de

270 mm de longitud, aproximadamente. La figura X-10 muestra su escala. Se le puede utilizar como microamperímetro o como microvoltímetro de alcances de $1 \mu\mu A$ a $1 \mu A$ y de $1 \mu V$ a 150 mV, respectivamente. También se usa como detector de cero. El galvanómetro pre-

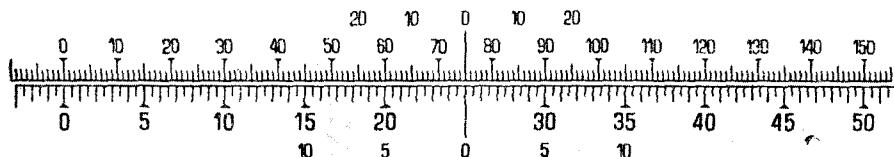


Figura X-10.

sentado en la foto de la figura X-11, es un galvanómetro destinado para uso en laboratorios universitarios. Su período de oscilación libre es de 4 seg., lo que permite su empleo como galvanómetro común y como balístico en demostraciones. La escala puede ser colocada en dos posiciones diferentes, a 25 y a 50 cm de distancia.

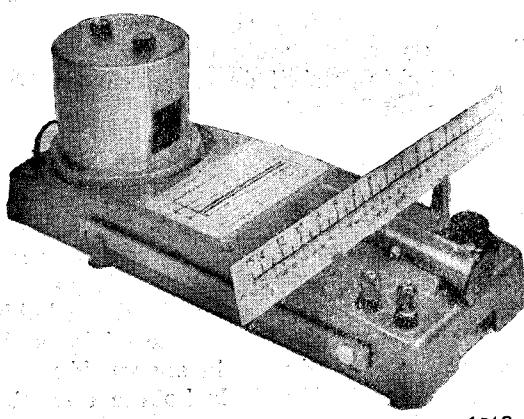


Figura X-11.

Período de oscilación libre (T_0)

Al conectar el galvanómetro a una fuente, la bobina móvil se desvía; luego, al desconectar la fuente, la bobina móvil empieza a oscilar acorde a la ley del péndulo de torsión. En estas condiciones el único amortiguamiento del movimiento se debe a la fricción del aire. Por ser

esta fricción inapreciable, se puede considerar este movimiento como oscilante no amortiguado. El tiempo que tarde en completarse una oscilación completa se denomina "período de oscilación libre" (T_0). El galvanómetro nunca trabaja en estas condiciones. Sin embargo, el período de oscilación libre T_0 es un factor que indica la velocidad de respuesta del instrumento y, por tanto, los fabricantes caracterizan los galvanómetros por su "período".

El movimiento oscilante de un galvanómetro no amortiguado es igual al de un péndulo de torsión que se define por la ecuación siguiente:

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{J}{k}}$$

donde

T_0 es el período de oscilación libre de la parte móvil,

J es el momento de inercia de la bobina móvil,

k es la constante de torsión del hilo de suspensión.

De la ecuación se deduce que el galvanómetro responde más rápidamente cuando la bobina tiene masa pequeña y es angosta y cuando el hilo de suspensión es corto y rígido. Sin embargo, los requisitos para la sensibilidad son exactamente opuestos.

Consideremos la bobina móvil de un galvanómetro (representada en la figura X-12). En esta figura tenemos las notaciones siguientes:

a es el ancho de la bobina (2)

b es la altura de la bobina (2)

n es el número de espiras de la bobina (2)

I es la intensidad de corriente que circula por la bobina

B es la inducción magnética en el entrehierro

l es la longitud del hilo de suspensión de la bobina

J es el momento de inercia del carrete de la bobina

k es la constante de torsión de la suspensión

α es el ángulo de desviación de la bobina durante la desviación

La fuerza producida por cada conductor vertical de longitud b , de la bobina es

$$F = B \cdot I \cdot b$$

El brazo de aplicación de la fuerza es

$$\frac{a}{2}$$

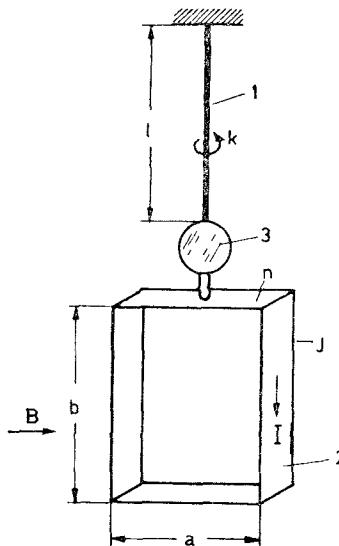


Figura X-12.

El momento motor que produce cada uno de los conductores es

$$M' = B \cdot I \cdot b \cdot \frac{a}{2}$$

La cantidad de conductores verticales que producen el momento es $2 \cdot n$ y, en consecuencia, el momento motor total es:

$$M_m = B \cdot I \cdot b \cdot \frac{a}{2} \cdot 2 \cdot n = B \cdot I \cdot b \cdot a \cdot n$$

$b \cdot a = S$ es el área activa de la bobina; sustituyendo tenemos
 $M_m = B \cdot I \cdot S \cdot n$.

Cuando el galvanómetro está conectado, la bobina móvil se detiene en una posición en la cual el momento motor es igual al momento antagonista originado por la torsión del hilo de suspensión

$$M_m = M_a \text{ y sustituyendo } B \cdot I \cdot S \cdot n = k\alpha$$

Cuando el espejo (3) fijado a la bobina (2) debido al movimiento de la bobina, se desvía en un ángulo α , la desviación del rayo de luz J será 2α (fig. X-2). Según la ecuación: $T_0 = 2 \cdot \pi \frac{J}{k}$ el período de os-

cilación libre depende de dos factores: 1) del momento de inercia J del carrete de la bobina móvil y 2) de la constante de torsión k del hilo de suspensión. Esta constante k depende de la longitud del hilo de suspensión, de la magnitud de su sección, de la forma de su sección (circular, cuadrado, rectangular) y del módulo de elasticidad del material que lo compone.

De estas consideraciones surge que la diferencia entre distintos tipos de galvanómetros radica en la conformación y en la suspensión de la bobina móvil. En base a estas diferencias dividimos los galvanómetros en los tipos siguientes:

1. *Galvanómetro común* que se utiliza como detector de cero en circuitos de corriente continua, en métodos de comparación de desviación y para medir corrientes y tensiones muy pequeñas; se caracteriza por su período de oscilación libre T_0 de poca duración. Por lo general, este período oscila entre 1 y 2 segundos, aproximadamente. Esta característica se logra con una bobina móvil de masa pequeña cuyas proporciones respeten la regla $a < b$ (fig. X-13a). Además, la suspensión debe ser corta.

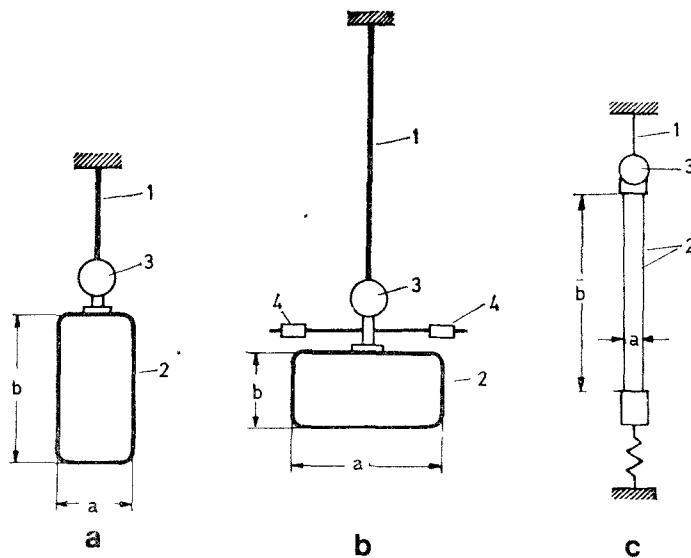


Figura X-13.

2. *Galvanómetro balístico* que se utiliza para medir efectos de cargas eléctricas instantáneas y en mediciones magnéticas, se caracteriza por su período de oscilación libre T_0 de larga duración. Por lo

general, este período es mayor de 10 s (frecuentemente 20 a 30 s). En este tipo de galvanómetro se toma la lectura de la máxima desviación durante la primera oscilación. Esta característica se obtiene con la bobina móvil de gran momento de inercia J , lo que implica una bobina de masa grande y proporciones que siguen la regla $a > b$ (figura X-13b). En algunos modelos, para aumentar el momento de inercia de la parte móvil, se agrega pesos adicionales (4). Además, la longitud del hilo de suspensión es considerable.

3. *Galvanómetro lento* (fluxómetro) se utiliza para mediciones de flujos magnéticos constantes. Se caracteriza por su período de oscilación extremadamente largo, es decir, del orden de varias decenas de segundos. Esta característica se obtiene con un momento de inercia J , de la parte móvil, muy pequeño y con casi total ausencia del momento antagonista. Su escala es graduada ya en magnitudes magnéticas, siendo este galvanómetro el único que tiene escala graduada en unidades de la misma magnitud que la medida.

4. *Galvanómetro de vibración* (de resonancia) se utiliza como detector de cero en circuitos de medición de corriente alterna. La parte móvil entra en oscilaciones debido a la frecuencia de la corriente alterna aplicada. Su período de oscilación es extremadamente corto (del orden de microsegundos). Los fabricantes lo caracterizan, no por el período T_0 , sino por el margen de frecuencia. Es obvio que el momento de inercia de su parte móvil debe ser muy pequeño y, en consecuencia, la bobina en su conformación tiene que cumplir con la condición $a \ll b$ (fig. X-13c). Por lo general, la bobina es de una espira. Frecuentemente se lo construye como sistema de imán móvil.

Con el fin de poder comparar los galvanómetros de distintas marcas y modelos se definen a continuación las características que éstos poseen en común.

Desviación estandarizada

La desviación estandarizada es la desviación de 1 mm sobre una escala colocada a la distancia de 1 m desde el espejo del galvanómetro. En galvanómetros que tienen la escala fija y colocada a una distancia menor que 1 m se considera como la desviación estandarizada la división más pequeña de la escala.

Sensibilidad de corriente

La sensibilidad de corriente del galvanómetro se define como la intensidad de corriente dada en microamperios, necesaria para obtener la desviación estandarizada. Es importante subrayar que, cuanto mayor es la sensibilidad, tanto menor es la cifra.

Sensibilidad de tensión

La sensibilidad de tensión se define como la fuerza electromotriz dada en microvoltios requerida para obtener la desviación estandarizada. Cuando esta fem se da como la tensión aplicada a los bornes directos del galvanómetro, se puede calcular la sensibilidad de tensión como producto de la sensibilidad de corriente por la resistencia del galvanómetro. Sin embargo, existe discrepancia entre los datos proporcionados por los fabricantes europeos y los proporcionados por los fabricantes americanos. Estas discrepancias deben ser tomadas muy en cuenta por el personal que tenga a su cargo la adquisición de galvanómetros. Las firmas europeas definen la sensibilidad de tensión en base a la resistencia del galvanómetro solamente; en cambio, las firmas americanas calculan la tensión aplicada al galvanómetro conectado con la resistencia crítica (ver página 231), en conjunto.

Sensibilidad balística

La sensibilidad balística se define como la cantidad de electricidad dada en coulombios que debe ser descargada a través del galvanómetro para obtener la desviación estandarizada.

En términos generales, la sensibilidad de un galvanómetro (de corriente, de tensión y balística), es inversamente proporcional a las dimensiones de la bobina. Por otra parte, las bobinas muy pequeñas presentan dificultades en la suspensión y en la construcción del sistema óptico. Los espejos muy pequeños y finos no tienen características ópticas muy buenas, además, el peso del espejo que soporta la bobina debe ser reducido al mínimo.

Ecuación del movimiento cinético

La ecuación básica del movimiento de la parte móvil del galvanómetro, conocida como ecuación de Gauss, es la siguiente:

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + p \frac{d\alpha}{dt} + k\alpha = B \cdot a \cdot b \cdot n \cdot i \cdot \cos \omega t = G \cdot i \cdot \cos \omega t$$

donde: $G = B \cdot a \cdot b \cdot n$; J es el momento de inercia de la parte móvil; p es el coeficiente de amortiguamiento y k es la constante de la suspensión de la parte móvil.

Esta ecuación representa la desviación α de la bobina móvil con respecto a tiempo t . La parte izquierda de la ecuación representa momentos que actúan en sentido contrario al movimiento angular y la parte derecha de la ecuación representa el momento motor producido

en la bobina por la corriente $i \cdot \cos \omega t$. Si la corriente es de valor constante, como sucede con la corriente continua, en tal caso $\omega = 0$ y $\cos \omega t = 1$. En galvanómetros de corriente alterna (de vibración) la corriente es periódicamente variable y, por tanto, la función es senoidal. El valor $G = B \cdot a \cdot b \cdot n$ se conoce como constante del galvanómetro y, como se puede apreciar, depende de dimensiones y propiedades físicas que caracterizan cada tipo de galvanómetro.

En un galvanómetro bien diseñado la forma de los polos del imán permite mantener la inducción magnética B de valor constante a lo largo del entrehierro. Considerando que la constante del galvanómetro G es constante se puede escribir la ecuación de la siguiente manera:

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + p \frac{d\alpha}{dt} + k\alpha = G \cdot I$$

Consideremos cada término de la parte izquierda de la ecuación:

El término $J \frac{d^2\alpha}{dt^2}$ es el momento que actúa en sentido contrario al movimiento debido al momento de inercia de la parte móvil. Este momento será proporcional a la aceleración angular $\frac{d^2\alpha}{dt^2}$. En el galvanómetro de período de oscilación libre (T_0) de corta duración, este momento debe ser pequeño y en cambio en galvanómetros balísticos debe ser deliberadamente muy grande. En algunas construcciones de galvanómetros balísticos se agregan unas pesas adicionales a la parte móvil, para obtener un gran momento de inercia (J), figura X-13b.

El término $p \frac{d\alpha}{dt}$ es el otro momento que actúa en sentido contrario al movimiento debido a la fricción del aire y es proporcional a la velocidad angular. En la mayoría de galvanómetros este momento de amortiguación es pequeño si se omite la influencia de corrientes de Foucault generadas en el carrete de la bobina. La ventaja de tener este amortiguamiento mecánico pequeño es la posibilidad de fácil control eléctrico mediante resistencias externas en el circuito del galvanómetro o en caso de necesidad (transporte), "shuntar" el instrumento.

El último término $k\alpha$ es el momento antagonista (M_a) originado por el hilo de suspensión (o espiral) y es proporcional al ángulo de desviación α . Es muy importante, ya que permite en gran medida determinar la sensibilidad del galvanómetro. Como es sabido, en estado

de equilibrio y cuando se detiene la parte móvil, la solución de la ecuación es simple:

$$G \cdot I = k \cdot \alpha \quad \text{o sea} \quad M_m = M_a$$

En este instante la aceleración angular y la velocidad angular son iguales a cero.

A diferencia del galvanómetro común, del cual se requiere la respuesta instantánea (T_0 de corta duración), en galvanómetros balísticos se persigue la obtención de los momentos de amortiguación (M_{am}) y antagonista (M_a) lo más pequeños posible. En cambio, el momento contrario debido a la inercia de la parte móvil, representado por el 1.^{er} término de la ecuación debe ser deliberadamente muy grande. En este caso, la ecuación de Gauss tendrá la forma siguiente, aproximadamente:

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} = G \cdot I$$

Los momentos M_{am} y M_a por ser de valor despreciable se omiten. La solución de esta ecuación es

$$Q = C_b \cdot \alpha_1$$

donde $Q = \int idt$, o sea, carga, α_1 es la desviación producida por la corriente I_g en el galvanómetro y C_b la constante balística.

Galvanómetro común (T_0 entre 1 y 2 segundos aprox.)

Al conectar una resistencia R_c (fig. X-14), entre los bornes del galvanómetro se produce una acción de frenado dinámico. Cada mo-

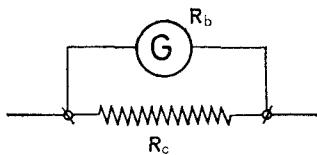


Figura X-14.

vimiento de la bobina da origen a una fem que hace circular una corriente a través del galvanómetro y de la resistencia conectada. Los conductores de la bobina que se encuentran en el campo magnético del imán (en el entrehierro) producen una fuerza opuesta al movimiento, cuyo resultado es el frenado amortiguador. La resis-

tencia R_c conectada a los bornes del galvanómetro se denomina "resistencia de amortiguamiento". Cuando esta resistencia R_c es demasiado pequeña la acción de frenado es excesiva y el galvanómetro es sobreamortiguado. En estas condiciones la bobina móvil (con su espejo) se mueve demasiado lentamente en ambos sentidos, siendo su movimiento aperiódico (fig. III-4). Cuando la resistencia de amortiguamiento es demasiado grande, la bobina móvil oscila demasiado durante la toma de lectura, el movimiento es periódico y el galvanómetro es subamortiguado. El tipo de movimiento que se requiere depende del tipo de medición a efectuar con el galvanómetro. Cuando se miden magnitudes que varían poco, o lentamente, es conveniente utilizar un galvanómetro, cuyo movimiento es aperiódico (figura III-4), similar al que se utiliza en instrumentos comunes. Cuando se utiliza el galvanómetro como detector de cero es importante que el instrumento acuse únicamente la existencia y el sentido de la corriente con rapidez y sin oscilaciones sobre cero. En estos casos, el más conveniente es el movimiento aperiódico crítico. Si el galvanómetro tuviera un movimiento periódico sería difícil establecer el sentido de la corriente salvo durante la primera oscilación (galvanómetro balístico).

Se requieren las siguientes características eléctricas y mecánicas de un galvanómetro común utilizado como detector de cero:

1. Alta sensibilidad de corriente.
2. Período de oscilación libre (T_0) de corta duración.
3. Buena estabilidad en cero.
4. Bajo coeficiente de temperatura.
5. Buen equilibrio estático.
6. Inmunidad a vibraciones. Esto es muy difícil de conseguir.

Como ya se ha mencionado, en las espiras de la bobina se genera, durante su movimiento $\left(\frac{d\phi}{dt} \right)$, una fuerza electromotriz. Debida a esta f.e.m. circula en el circuito, compuesto por la bobina móvil de resistencia R_b y la resistencia R_c una corriente

$$i = \frac{e}{R_b + R_c}$$

La acción conjunta de esta corriente y del campo magnético del imán permanente produce el momento amortiguador M_{am} , el cual se puede calcular según la fórmula

$$M_{am} = B \cdot a \cdot b \cdot n \cdot i$$

donde

B es la inducción magnética en el entrehierro

a es el ancho de la bobina (fig. X-12)

b es la longitud de la bobina

n es el número de espiras de la bobina

Sustituyendo el valor de la corriente inducida tenemos

$$M_{am} = B \cdot a \cdot b \cdot n \cdot \frac{e}{R_b + R_c}$$

La fuerza electromotriz inducida en la bobina es: $e = -n \frac{d\phi}{dt}$.

Cuando la bobina móvil se mueve hacia adelante genera una fuerza electromotriz opuesta a la tensión aplicada. En este instante la disminución de la corriente es proporcional a la velocidad angular. Esto previene contra una velocidad excesiva que originaría la oscilación. Durante el movimiento de retorno (hacia cero), la fem generada se invierte y se produce el momento motor opuesto. Esto también evita la oscilación sobre cero. Cualquier momento que es proporcional a la velocidad angular es el momento de amortiguación.

La relación entre el flujo magnético ϕ en el entrehierro y la bobina de n número de espiras se puede expresar mediante la fórmula

$$\phi = B \cdot a \cdot b \cdot n \cdot \alpha$$

$$e = -n \frac{d\phi}{dt} = -B \cdot a \cdot b \cdot n \frac{d\alpha}{dt}$$

Sustituyendo e en la ecuación que expresa el momento M_{am} tenemos:

$$M_{am} = B \cdot a \cdot b \cdot n \cdot \frac{e}{R_b + R_c} = -\frac{(B \cdot a \cdot b \cdot n)^2}{R_b + R_c} \cdot \frac{d\alpha}{dt}$$

El signo ($-$) significa que el sentido del momento de amortiguación es contrario al sentido del movimiento.

El segundo término de la ecuación de Gauss expresa

$$M_{am} = -p \frac{d\alpha}{dt}$$

El factor de amortiguamiento D está relacionado con el coeficiente de amortiguamiento p según la fórmula

$$D = \frac{p}{2\sqrt{J \cdot k}}$$

donde

J es el momento de inercia de la parte móvil,

k es el coeficiente de elasticidad de la suspensión (torsión),

p es el coeficiente de amortiguamiento.

Sustituyendo en el segundo término de la ecuación de Gauss p tenemos:

$$M_{am} = -2D \sqrt{J \cdot k} \frac{d\alpha}{dt}$$

De la comparación de ambas expresiones del momento M_{am} se obtiene:

$$\frac{(B \cdot a \cdot b \cdot n)^2}{R_b + R_c} = 2D \sqrt{J \cdot k} \quad \text{de donde} \quad R_b + R_c = \frac{(B \cdot a \cdot b \cdot n)^2}{2D \sqrt{J \cdot k}}$$

De esta última expresión se deducen las siguientes conclusiones:

Cuando $D < 1$ significa que la parte móvil tendrá el movimiento periódico; cuando $D = 1$ significa que la parte móvil tendrá el movimiento aperiódico crítico (fig. III-4) y finalmente cuando $D > 1$ la parte móvil tendrá el movimiento aperiódico. El tipo de movimiento que es requerido para que el galvanómetro tenga un funcionamiento apropiado, es el movimiento aperiódico crítico, o sea, cuando $D = 1$. Esto se obtiene cuando

$$R_b + R_c = \frac{(B \cdot a \cdot b \cdot n)^2}{2 \sqrt{J \cdot k}}$$

y el valor de la resistencia "crítica" será

$$R_{crit} = \frac{(B \cdot a \cdot b \cdot n)^2}{2 \sqrt{J \cdot k}} - R_b$$

La "resistencia crítica externa" del galvanómetro es el valor de la resistencia que se conecta al galvanómetro para que éste funcione con el movimiento aperiódico crítico.

La resistencia crítica del galvanómetro puede ser también determinada experimentalmente. La operación consiste en conectar sucesivamente resistencias externas de varios valores al galvanómetro, y observar simultáneamente el movimiento del punto luminoso sobre la escala hasta obtener el movimiento aperiódico crítico.

SENSIBILIDADES Y CONSTANTES

La sensibilidad del galvanómetro se define como la derivada del

ángulo de desviación de la parte móvil respecto a la magnitud medida (Cap. III)

$$S = \frac{d\alpha}{dX}$$

Asumiendo que la escala que se utiliza con el galvanómetro es uniforme, se puede expresar la sensibilidad de la manera siguiente:

$$S = \frac{\alpha}{X}$$

donde

α es la desviación de la parte móvil,
 X es la magnitud medida.

Como es sabido, cuando el galvanómetro está provisto de sistema óptico con luz reflejada, el ángulo del rayo de luz incidente es el doble del ángulo de desviación de la parte móvil (fig. X-2) y, por tanto

$$S = \frac{2\alpha}{X}$$

La lectura se efectúa observando el desplazamiento a del punto lumínoso sobre la escala. Por lo general, este desplazamiento se mide en milímetros y consecuentemente la sensibilidad se expresa en milímetros por unidades de la magnitud medida. La *sensibilidad de corriente* será

$$S_i = \frac{a}{I} (\text{mm}/\mu\text{A})$$

por tratarse de intensidades muy pequeñas. Cuando se utiliza el galvanómetro para medir tensiones se recurre a la sensibilidad de tensión.

Se calcula la tensión aplicada a los bornes del galvanómetro por la Ley de Ohm: $U = I \cdot R_g$ donde R_g es la resistencia interna del galvanómetro. La *sensibilidad de tensión* se expresa por

$$S_u = \frac{a}{I \cdot R_g} = \frac{S_i}{R_g} (\text{mm}/\mu\text{V})$$

El valor inverso de la sensibilidad se denomina la *constante de galvanómetro*. Según el uso que se da al galvanómetro utilizamos la constante de tensión y la constante de intensidad.

La constante de intensidad será: $C_i = \frac{1}{S_i}$ en (A/mm)

$$\text{La constante de tensión será: } C_u = \frac{1}{S_u} \text{ en (V/mm)}$$

Las tablas adjuntas son ejemplos de la presentación de las características de galvanómetros comunes normalmente empleados en catálogos de las firmas productoras. La primera, corresponde a un catálogo de la firma Tinsley Co (Inglaterra) y, la segunda, a la firma AOIP (Francia).

RESISTANCE OHMS.	PERIODIC TIME SECS.	SENSITIVITY		DAMPING RESISTANCE OHMS.
		mm/ μ A	mm/ μ V	
3	2	45	15	20
5	2	142	28	120
10	2	210	21	450
50	2	450	9	2,500
140	2	825	6	4,500
450	2	2,250	5	30,000

Caractéristiques sur position G					
Ref.	Sensibilité p mm 10^{-9} A	* 10^{-6} V	Periode en s.	Résistance en Ω int.	Résistance en Ω ext. crit.
G 321	25	1,1	2	15	30
G 323	10	8,4	1,6	88	750
G 325	1	26	2	1 250	25 000

Algunas firmas dan, en sus catálogos, la sensibilidad en μ A/mm, μ V/mm y μ C/mm, o sea, a la inversa de lo expuesto. En este caso esto significa la constante.

CAMBIO DE ALCANCE

El cambio de alcance de instrumentos magnetoeléctricos se ha descrito ya en el Capítulo IV. Utilizando una resistencia calibrada —shunt— en paralelo al amperímetro o una resistencia también calibrada en serie con el voltímetro se puede cambiar el alcance de estos instrumentos. Estos procedimientos son válidos si se asume que el cambio del valor de la resistencia de instrumentos resultante no influirá en forma apreciable sobre el valor de la magnitud medida. Es decir, que no influya sobre la resistencia del circuito controlado.

Los galvanómetros se utilizan para medir tensiones o intensidades en circuitos cuya resistencia tiene valores del mismo orden que la resistencia del galvanómetro, a diferencia de los instrumentos comunes. Cualquier variación de la resistencia del galvanómetro conectado al circuito originará variación de la magnitud medida. El problema se complica más todavía si se tiene en cuenta que la amortiguación del movimiento de la parte móvil del galvanómetro depende de la resistencia a la cual esté conectado. En resumen, el cambio de alcance del galvanómetro no debe originar variación de la resistencia del circuito controlado.

La figura X-15 muestra la conexión del galvanómetro al circuito en el cual se efectúa la medición. El galvanómetro mide entre los pun-

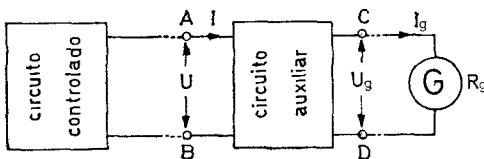


Figura X-15.

tos A y B. Entre el circuito controlado y el galvanómetro se intercala un circuito auxiliar cuya finalidad es variar el alcance del instrumento. Observando la figura y considerando lo citado referente al cambio del alcance del galvanómetro, se obtienen las siguientes conclusiones:

1. La resistencia comprendida entre los puntos A y B (medida en conjunto con el galvanómetro) debe tener un valor constante.
2. La resistencia comprendida entre los puntos C y D (medida en conjunto con el circuito controlado) debe tener un valor constante.

Estas exigencias pueden ser obtenidas de las siguientes maneras:

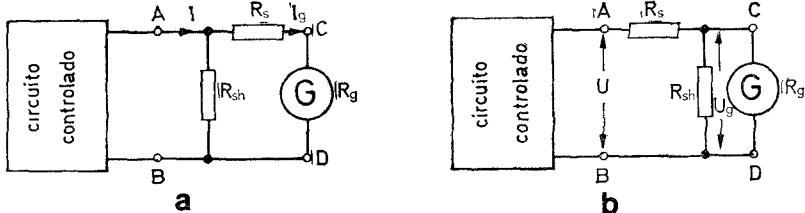


Figura X-16.

1. Para ampliar el alcance de intensidad del galvanómetro se utiliza el esquema "a" de la figura X-16. En este caso tenemos:

$$\text{I: } \frac{I_g}{I} = \frac{1}{n} \quad \text{e} \quad I_g(R + R_{sh}) = (I - I_g)R_{sh}$$

$$\text{II: } R_{CD} = R_{crit} = (R_s + R_{sh})$$

2. Para ampliar el alcance de tensión del galvanómetro, se debe utilizar el esquema "b" de la figura X-16. En este caso tenemos:

$$\text{I: } \frac{U_g}{U} = \frac{1}{n}$$

$$\text{II: } R_{CD} = R_{crit}$$

Es muy conveniente utilizar la resistencia variable conocida por el nombre de "shunt de Ayrton", la cual cumple en forma más aproximada ambas condiciones (fig. X-17).

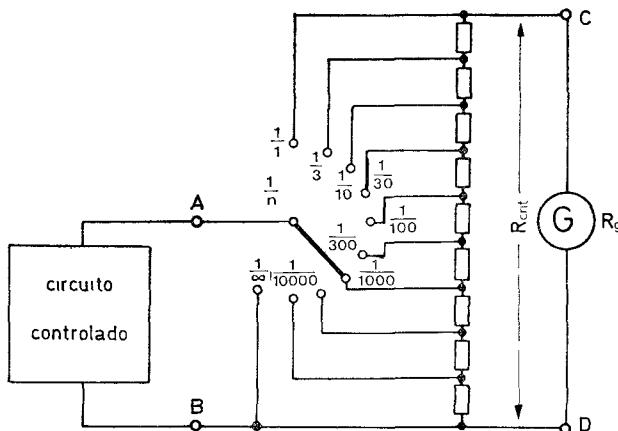


Figura X-17.

Galvanómetro balístico (T_0 entre 10 y 30 segundos aprox.)

El galvanómetro balístico es un tipo de galvanómetro de características tales que permiten utilizarlo de un modo muy especial. En lugar de hacer circular una corriente, a través de la bobina móvil, en forma continua, se aplica una carga de poca duración que únicamente da un impulso a la bobina móvil. La amplitud de la primera oscilación es proporcional a la carga que originó el impulso.

Para comprender este efecto es necesario asumir que la bobina móvil, debido a su construcción, no empieza a moverse hasta que termine de pasar en su totalidad la carga aplicada. En realidad, esta condición no puede ser realizada exactamente. Siempre, cuando la carga circula todavía, la bobina empieza a moverse, pero durante este lapso Δt (fig. X-18) su desplazamiento es muy pequeño. Cuando la to-

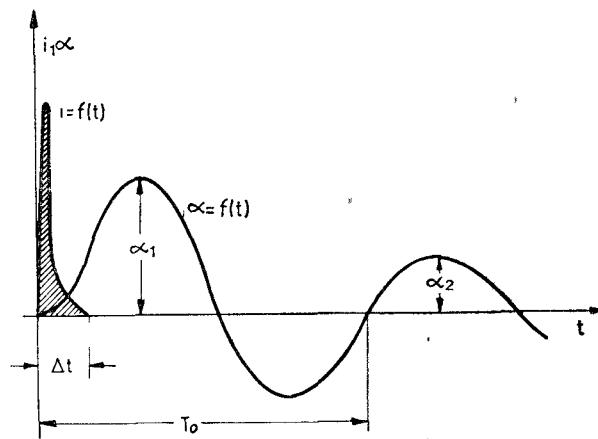


Figura X-18.

talidad de la carga ya ha circulado, en este momento la bobina móvil ha adquirido su máxima energía cinética, y sigue moviéndose lentamente venciendo la oposición del momento antagonista originado por el hilo de suspensión. Luego, la energía cinética se transfiere a la suspensión en la cual aparece en forma de energía potencial, acumulada debido a la desviación resultante de la parte móvil. Finalmente, el movimiento cesa al llegar a la amplitud máxima de oscilación. En este preciso instante se deberá tomar la lectura. Después, la parte móvil invierte su sentido de movimiento debido a la energía potencial acumulada en la suspensión, y debido a su inercia oscilará nuevamente pasando por cero, con amplitudes decrecientes hasta consumir totalmente la energía cinética acumulada. Este movimiento de la bobina móvil es periódico. La oposición del aire disipa un poco de energía también durante la primera oscilación, lo que constituye una fuente de error. Sin embargo, este error puede ser despreciable si se calibra el galvanómetro haciendo pasar por él una carga de valor conocido.

De estas consideraciones surge que el momento de inercia (J) de la bobina móvil tiene gran importancia. Para asegurar que la carga

termine de pasar antes que la bobina haga un desplazamiento apreciable, el momento de inercia (J) debe ser sumamente grande en comparación con el de un galvanómetro común y la constante de torsión (k) del hilo de suspensión debe tener un valor pequeño. Esto se consigue adecuando la conformación de la bobina y utilizando pesas adicionales (fig. X-13b). También el hilo de suspensión debe tener una longitud considerable.

Como ya se ha mencionado anteriormente, en el galvanómetro balístico se trata de obtener ciertas características que pueden ser representadas por la ecuación de Gauss, simplificada, en la cual se omiten los términos $2.^o$ y $3.^o$. Esta omisión se puede hacer cuando los momentos M_{am} y M_a son de valor despreciable. En este caso se puede escribir:

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} = G \cdot I \quad \text{de donde} \quad \frac{d^2\alpha}{dt^2} = \frac{G}{J} I$$

integrandos obtenemos: $\frac{G}{I} \int_0^{\Delta t} idt = \frac{G}{J} Q$; donde Q es la carga que ha pasado por la bobina.

SENSIBILIDAD Y CONSTANTE

La constante balística C_b se puede determinar en base al equilibrio de momentos, lo cual se presenta cuando la bobina se detiene al llegar a la amplitud máxima en su primera oscilación. En este instante el momento motor (M_m) es igual al momento antagonista (M_a) originado por la suspensión, o sea, cuando $M_m = M_a$.

El momento motor es $M_m = C_b \cdot i$ y el momento antagonista $M = k \cdot \alpha$

$$C_b \cdot i = k \cdot \alpha \quad ; \quad C_b = k \cdot \frac{\alpha}{i}$$

La sensibilidad de corriente del galvanómetro se expresa por

$$S_i = \frac{\alpha}{I} (\text{mm}/\mu\text{A})$$

Considerando que $\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{a}{R}$ (R la distancia del espejo fig. X-2)

y para ángulos pequeños $\alpha = \frac{a}{2R}$ sustituyendo en la fórmula de constante balística tenemos:

$$C_b = k \cdot \frac{a}{2RI} = k \frac{S_i}{2R}$$

La constante k se puede determinar por la fórmula del periodo de oscilación libre T_0 ,

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{J}{k}} \quad ; \quad T_0^2 = 4\pi^2 \frac{J}{k} \quad ; \quad k = 4\pi^2 \frac{J}{T_0^2}$$

sustituyendo k en la fórmula de C_b tenemos:

$$C_b = 4\pi^2 \frac{J}{T_0^2} \cdot \frac{a}{2Ri} = 2\pi^2 \frac{J}{T_0^2} \cdot S_{ib}$$

$S_{ib} = \frac{S_i}{R}$ es la sensibilidad de corriente del galvanómetro balístico.

Por lo general, se la expresa para la distancia del espejo = 1 m. Es conveniente determinar la amplitud de la primera oscilación α_1 como función de la carga eléctrica Q .

$$Q = C_b \cdot \alpha_1 \quad o \quad C_b = \frac{Q}{\alpha_1}$$

Resistance	Sensitivity at 1 metre		P. T.
	mm. / microamp.	mm. ' microcoulomb.	
500	250	310	5
1000	1100	860	8
4000	3500	2000	11

La tabla adjunta es una copia de una de las tablas del catálogo de galvanómetros balísticos de la firma "Tinsley" (Inglaterra). La figura X-19 muestra un típico galvanómetro balístico fabricado por la mencionada firma. Nótese un tubo sobresaliente, el cual contiene el largo hilo de suspensión necesario para obtener la constante de torsión k de bajo valor.

Galvanómetro lento (Fluxómetro) ($T_0 > 100$ segundos)

El galvanómetro denominado "lento" o "fluxómetro" es otra variante del galvanómetro magnetoeléctrico. Es un instrumento de bobina móvil, integrante, cuyas características principales son la casi total inexistencia del momento antagonista (M_a) y el valor del momen-

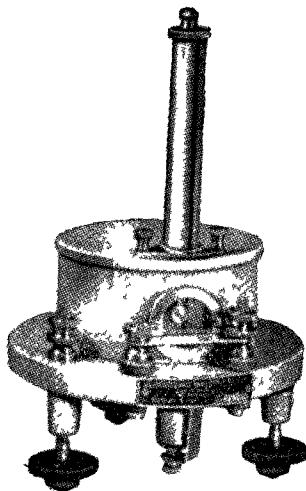


Figura X-19.

to de inercia (J) de la parte móvil extremadamente reducido. Estas características, tan particulares, son la causa de que la ecuación de Gauss

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + p \frac{d\alpha}{dt} + k \cdot \alpha = G \cdot I$$

tenga la siguiente forma simplificada:

$$p \frac{d\alpha}{dt} = G \cdot I = M_m$$

La simplificación se debe a que el 1.^{er} término $\left(J \frac{d^2\alpha}{dt^2} \right)$ y el 3.^{er} término ($k \cdot \alpha$) tienden a cero.

El período de oscilación libre $\left(T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{J}{k}} \right)$ es extremamen-

te largo, sobre pasando, por lo general, los 100 segundos. Hallándose la bobina móvil suspendida de un hilo de seda se obtiene un momento antagonista sumamente reducido. Sin embargo, en algunos modelos, para anularlo por completo resulta conveniente fijar un trozo de un material diamagnético sobre la bobina móvil. La conexión eléctrica con la bobina móvil se efectúa mediante dos cintas de plata muy flexibles. Las resistencias, tanto de la bobina móvil como la del circuito

externo (bobina exploradora), son de bajo valor. La primera no excede de los $20\ \Omega$ y la segunda es del orden entre 30 y $50\ \Omega$. Estas resistencias, relativamente pequeñas, originan un amortiguamiento particularmente fuerte, de modo que el punto luminoso proyectado sobre la escala se detiene inmediatamente al terminar el impulso. Esto permite efectuar una fácil lectura del fluxómetro, contrariamente a lo que sucede cuando se utiliza el galvanómetro balístico, en el cual se debe tomar la lectura durante el movimiento.

El retorno de la bobina a la posición inicial (cero) se produce muy lentamente ($100\ s$) debido a la influencia del aún presente débil momento antagonista. También se puede hacer retornar la bobina a la posición cero utilizando un dispositivo mecánico o eléctrico según la construcción y tipo del galvanómetro.

Como es sabido, el momento motor del sistema magnetoeléctrico se expresa por la ecuación

$$M_m = B \cdot i \cdot b \cdot a \cdot n$$

De lo anterior se sabe que el coeficiente de amortiguamiento p se expresa por

$$p = \frac{(B \cdot a \cdot b \cdot n)^2}{R}$$

Sustituyendo esta expresión en la ecuación simplificada tenemos:

$$p \cdot \frac{d\alpha}{dt} = M_m = \frac{(B \cdot a \cdot b \cdot n)^2}{R} \cdot \frac{d\alpha}{dt} = B \cdot a \cdot b \cdot i \cdot n$$

de donde

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{R \cdot i}{B \cdot a \cdot b \cdot n} = \frac{R \cdot i}{\text{constante}} = \frac{R \cdot i}{C}$$

La resistencia R es la resistencia total del circuito por el cual circula la corriente i , o sea, es la suma de las resistencias de la bobina móvil, de la bobina exploradora y de los conductores. Por tanto, el producto $R \cdot i$ es la caída de tensión total originada por el impulso de la corriente. Esta caída de tensión es igual a la fem generada en la bobina exploradora durante su movimiento dentro del flujo magnético examinado.

CONSTANTE DE TENSION

De lo anterior tenemos, $R \cdot i = e$. Sustituyendo $\frac{R \cdot i}{C} = \frac{e}{C} = \frac{d\alpha}{dt}$

$$d\alpha = \frac{e}{C} dt = \frac{1}{C} edt ; \quad \alpha = \int d\alpha = \frac{1}{C} \int edt + \text{constante}$$

cuando $t = 0 — \alpha = \alpha_0$ y $\alpha = \frac{1}{C} \int edt + \alpha_0$

$$\alpha - \alpha_0 = \Delta \alpha = \frac{1}{C} \int edt$$

De esto se deduce que la desviación de la parte móvil es proporcional al impulso producido por una tensión. Esta tensión se origina en la bobina exploradora (1) conectada al galvanómetro (2), figura X-20, debido

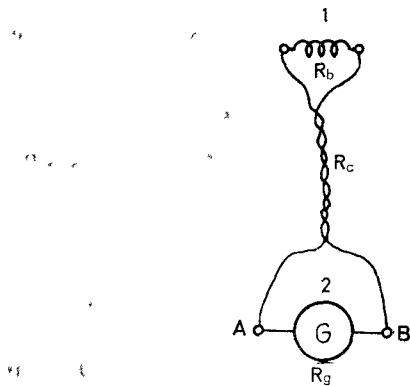


Figura X-20.

a la variación del flujo magnético $\left(\frac{d\phi}{dt} \right)$ que actúa sobre la bobina.

Sobre la desviación no influye el valor de la resistencia total del circuito R compuesta por la resistencia del galvanómetro (R_g), resistencia de la bobina exploradora (R_b) y la resistencia de los conductores (R_c) ($R = R_g + R_b + R_c$). Al aumentar el valor de la resistencia R disminuye en el circuito el impulso de la corriente, pero a la vez disminuye el grado de amortiguamiento y, en consecuencia, la desviación es la misma.

Los fabricantes dan, en sus catálogos, el valor máximo de la resistencia que puede ser conectada a los bornes A-B del galvanómetro (figura X-20), entendiéndose de que se trata de la suma de las resistencias $R_b + R_c$. Un ejemplo de las características de un fluxómetro está

en la tabla adjunta tomada del catálogo de la firma austriaca "Norma". Con estos valores aseguran indicaciones correctas.

Light-Spot Fluxmeter List no. 1705 01 690 (251 028)		NORMA Fabrik elektrischer Meßgeräte	
Reading constant C (Wb/sc div ⁻¹)	Terminal resistance approx. Ω R ₂	Permissible external resistance Ω R _b + R _c	
5 × 10 ⁻⁶	50	≤ 60	
1 × 10 ⁻⁵ — 2 × 10 ⁻⁵ — 5 × 10 ⁻⁵	20 — 27 — 30		
1 × 10 ⁻⁴ — 2 × 10 ⁻⁴ — 5 × 10 ⁻⁴	30 — 30 — 30	≤ 30	
1 × 10 ⁻³ — 2 × 10 ⁻³ — 5 × 10 ⁻³	30 — 30 — 30		

Partiendo de la última ecuación se obtiene la constante denominada "constante de tensión"

$$C = \frac{\int edt}{\Delta \alpha}$$

El valor inverso de la constante C se denomina "sensibilidad de tensión" del fluxómetro S_u y se expresa por

$$S_u = \frac{1}{C} = \frac{\Delta \alpha}{\int edt}$$

EMPLEO DEL FLUXÓMETRO

Las mediciones que se efectúan con el galvanómetro lento o fluxómetro, se basan sobre la variación del flujo magnético que actúa sobre la bobina exploradora. La variación del flujo ($\frac{d\phi}{dt}$) se consigue introduciendo o retirando la bobina exploradora del campo magnético controlado. También se consigue esta variación girando en 90° la bobina exploradora dentro del campo magnético. Cuando el campo magnético está originado por un electroimán alimentado con la corriente continua, se obtiene la variación del flujo desconectando la alimentación.

La variación del flujo magnético relacionado con la bobina exploradora origina la generación de la fuerza electromotriz

$$e = -n \frac{d\phi}{dt}$$

donde n es el número de espiras de la bobina exploradora. De esto tenemos:

$$d\phi = \frac{edt}{n}$$

e integrando

$$\phi = \frac{1}{n} \int edt = \frac{1}{n} C \Delta \alpha$$

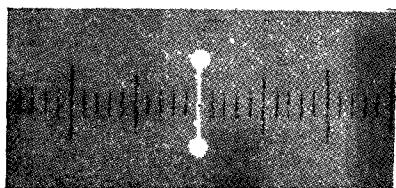
Por lo general la constante C se expresa en Maxwell vueltas por división.

Galvanómetro de vibración (de resonancia)

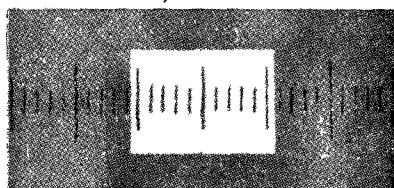
El galvanómetro de vibración, también denominado "Galvanómetro de resonancia", es un tipo de galvanómetro que se utiliza como detector de cero en circuitos de puentes y de compensadores de corriente alterna. En este tipo de galvanómetro la parte vibrante se considera como la parte móvil; ésta consiste en una bobina móvil de una espira o un imán permanente de dimensiones muy reducidas. Según el sistema motor empleado existen galvanómetros de bobina móvil magnetoeléctricos o de imán móvil magnetoeléctricos y electromagnéticos.

El principio de funcionamiento del galvanómetro de resonancia está basado en la resonancia de la parte móvil con la frecuencia del circuito controlado.

En todos los tipos de galvanómetros de vibración las lecturas se efectúan mediante una raya luminosa proyectada sobre una escala transparente por un sistema óptico convencional ya descrito. La figura X-21a muestra cómo se ve la escala cuando la parte móvil no



a)



b)

Figura X-21.

vibra y acusa cero. Durante las vibraciones la raya luminosa se mueve a lo largo de la escala con tal velocidad que se observa únicamente un rectángulo luminoso que se alarga con el incremento de la amplitud (fig. X-21b). La longitud del rectángulo luminoso está en función de la amplitud de vibraciones, es decir de la amplitud de la corriente que circula por el sistema.

La figura X-22 muestra el sistema del galvanómetro de vibración de Hartmann & Braun. La parte móvil del sistema consiste en un

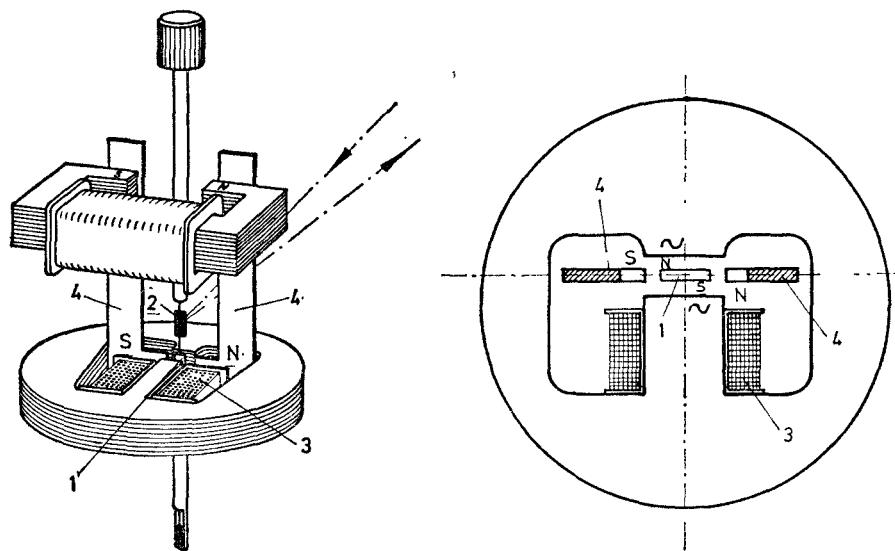


Figura X-22.

imán permanente (1) de tamaño muy reducido, que está suspendido mediante una tensada cinta elástica. Sobre la cinta está también fijado el espejo (2), el cual forma parte del sistema óptico igual que en otros tipos de galvanómetros de espejo. El imán (1) está ubicado dentro del entrehierro de un circuito magnético energizado por la corriente alterna mediante el arrollamiento (3) conectado al circuito controlado. En este mismo entrehierro actúa también un campo magnético constante producido por los polos (4) de otro electroimán alimentado por una corriente continua, tomada de una fuente auxiliar. El campo magnético variable originado por el arrollamiento (3) induce las oscilaciones del imán (1). La mayor sensibilidad se obtiene cuando la frecuencia propia de oscilaciones de la parte móvil (imán 1)

entra en resonancia con la frecuencia de la corriente del circuito controlado. Esta frecuencia propia depende de dos factores: del momento de inercia J de la parte móvil y de las fuerzas direccionales adicionales. Las fuerzas direccionales adicionales se deben a dos causas. Una es la torsión de la cinta elástica de suspensión y la segunda es el campo magnético constante originado por el imán de corriente continua cuyos polos (4) actúan adicionalmente en el entrehierro. Variando los amperiovoltas del campo magnético constante se puede modificar la frecuencia propia de la parte móvil, ajustando de esta manera el margen de resonancia a la frecuencia del circuito controlado. De este modo, el galvanómetro puede operar en distintos márgenes de frecuencia. La figura X-23 muestra el esquema de un regulador combinado para este tipo de galvanómetro de vibración, fabricado por

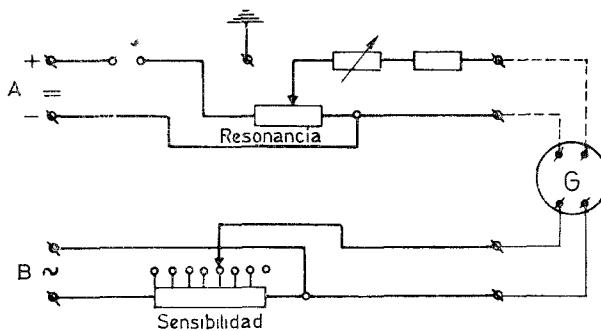


Figura X-23.

Hartmann & Braun. Se pueden apreciar dos circuitos independientes: uno (A), alimentado por una fuente especial de corriente continua, que se utiliza para ajuste del margen de resonancia y el otro (B) que es el regulador de sensibilidad del galvanómetro.

Otro tipo de galvanómetro de vibración funciona según el principio de bobina móvil. La figura X-24 muestra el principio de su construcción. La bobina móvil (1), ubicada entre los polos de un imán permanente, consiste en una espira formada por dos cintas metálicas. Ambas cintas, que actúan como lados de la bobina, están apoyadas sobre dos prismas (2) de material aislante y tensadas mediante el resorte (4). El espejo (3) está fijado al lazo. Las condiciones de resonancia pueden ser reguladas cambiando la distancia (L) entre los apoyos prismáticos (2) y variando la tensión del resorte de suspensión (4).

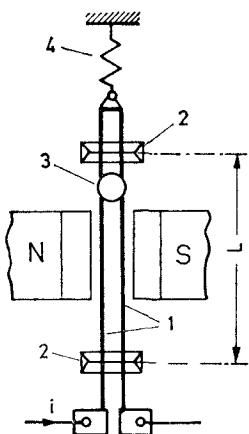


Figura X-24.

SENSIBILIDAD

Se entiende por sensibilidad del galvanómetro de vibración el ensanchamiento del rectángulo luminoso originado por una corriente de $1 \mu\text{A}$ o una tensión de $1 \mu\text{V}$, sobre la escala colocada a una distancia de 1 m del instrumento. La parte móvil debe estar en resonancia con la frecuencia de la corriente del circuito controlado.

La sensibilidad de corriente se determina con una resistencia externa de alto valor y con el galvanómetro sintonizado a resonancia. La sensibilidad es inversamente proporcional al grado de amortiguamiento y a la frecuencia propia de la parte móvil.

La sensibilidad de tensión se determina con una resistencia externa de pequeño valor. La sensibilidad de tensión puede ser aumentada únicamente a costa de la sensibilidad de corriente.

La sensibilidad de corriente continua comprende la desviación unilateral de la señal luminosa desde la posición cero (reposo) producida por una corriente continua de $1 \mu\text{A}$. Se la mide con la fuerza direccional correspondiente a la frecuencia del circuito controlado a medir. En base a las dos sensibilidades, alterna y continua, se puede calcular la sensibilidad de la frecuencia.

El galvanómetro de vibración tiene su máxima sensibilidad cuando la frecuencia propia de la parte móvil entra en resonancia con la frecuencia del circuito controlado. La sensibilidad decae rápidamente por la desintonización de ambas frecuencias. La diferencia entre las

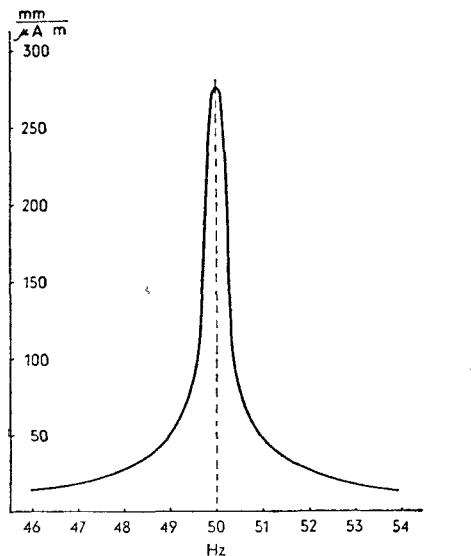


Figura X-25.

frecuencias (propia y del circuito controlado) expresada en tanto por ciento, que origina la disminución de la sensibilidad nominal a la mitad, se denomina “sensibilidad de resonancia”. La figura X-25 ilustra este concepto. La curva representa la variación de la sensibilidad cuando la frecuencia de la red se aparta de su valor nominal.

Capítulo XI

VERIFICACION DE INSTRUMENTOS DE MEDICION

Generalidades

Por "verificación" se comprende la comprobación del estado y de la clase de exactitud del instrumento. En este capítulo se tratará de la verificación que haga el usuario al adquirir el instrumento y al efectuar un mantenimiento ocasional o periódico. No se tratará del contraste, ya que esto requiere procedimientos e instrumentación especiales y corresponde a los fabricantes.

La verificación requiere dos procedimientos: a) Examen visual durante la recepción y b) Control de funcionamiento (recepción y funcionamiento).

EXAMEN VISUAL

El examen visual se efectúa sin necesidad de lentes de aumento y su finalidad es comprobar: si el instrumento está marcado con los símbolos e indicaciones convencionales correctos, si el instrumento tiene escala correcta y si el instrumento está intacto. La caja del instrumento debe llevar un sello de seguridad. Este último es importante para poder exigir el cumplimiento de la garantía durante el período convenido. Sobre el cuadrante del instrumento deben figurar las indicaciones y los símbolos siguientes:

1. Nombre o marca de fábrica.
2. Número de fabricación.
3. Símbolo en letra o denominación de la magnitud medida (V, Voltios).
4. Símbolo del sistema del instrumento.
5. Sistema de corriente.

6. Clase de exactitud (Clase).
7. Posición de trabajo.
8. Símbolo de tensión de prueba de aislamiento.
9. Cuando el instrumento está graduado en conjunto con transformadores de medición, debe figurar la relación de transformación correspondiente, como por ejemplo: 5.000/100 V o 250/5 A.
10. Cuando el instrumento está graduado en magnitudes traducidas, el símbolo del convertidor adicional (°C, pH).
11. Valores nominales de temperatura del ambiente, frecuencia, factor de potencia. Cuando no figuran estos valores significa que la temperatura de ambiente es de 20 °C, la frecuencia es 45 - 53 Hz o 55 - 63 Hz y $\cos \phi = 1$.
12. Cuando son necesarios símbolos especiales.

CONTROL DE FUNCIONAMIENTO

Nivel de aislamiento. Esta prueba tiene por objeto la seguridad del personal y asegurar la continuidad de trabajo de la instalación a la que el instrumento está destinado. Los fallos de aislamiento pueden causar una diferencia de potenciales entre la caja y sus partes metálicas y tierra. Los valores de la tensión de prueba del instrumento dependen de la tensión nominal de trabajo. Para los instrumentos cuyas tensiones nominales están comprendidas entre 40 o 650 V, la tensión de prueba es de 2 kV. Los amperímetros se prueban con la tensión de 2 kV. Los instrumentos que trabajan en conjunto con transformadores de medida se prueban con 2 kV. La tensión de prueba de instrumentos de tensiones superiores a 650 V se determina mediante la fórmula:

$$U_p = \frac{2U_{\text{nom}}}{1000} + 1 \text{ kV}$$

donde U_p es la tensión de prueba y U_{nom} la tensión nominal. El valor de la tensión de prueba se obtiene sumando a 1 kV la excesiva cifra entera siempre mayor que la obtenida del cálculo. Si por ejemplo $U_{\text{nom}} = 800$ V, tenemos

$$U_p = \frac{2 \cdot 800}{1000} + 1 \text{ kV} = 1,6 + 1 = 2,6 \approx 3 \text{ kV}$$

Corrector de cero

Los instrumentos cuyo momento antagonista está originado por espirales, tienen por lo general un dispositivo para ajustar la posición

de la aguja indicadora en la posición inicial (cero). Las normas no exigen la existencia de este corrector en instrumentos de baja clase de exactitud (1,5 a 5). Durante la prueba del corrector de cero, el instrumento debe estar colocado en la posición indicada en el cuadrante. Cuando el instrumento no lleva indicación de posición, se le debe probar en dos posiciones: una horizontal y la otra vertical. Para efectuar esta prueba, el observador debe colocarse a una distancia del vidrio 20 veces mayor que la distancia que existe entre la escala y el vidrio.

Errores del instrumento en condiciones nominales

Los errores del instrumento se verifican en condiciones nominales (normales) determinadas por la temperatura del ambiente, frecuencia nominal y la corriente alterna sinusoidal. La determinación de los errores del instrumento se basa en la comparación de sus lecturas con las lecturas del instrumento patrón o con valores calculados mediante un dispositivo patrón. Como valor real (A_r) de la magnitud medida se toma el valor acusado por el instrumento patrón. Como instrumento patrón se debe utilizar un instrumento cuya clase de exactitud es superior a la del instrumento verificado. Para verificación de instrumentos de corriente continua se emplean como patrones instrumentos magnetoeléctricos y para verificación de instrumentos de corriente alterna los patrones son electrodinámicos o electromagnéticos. En caso de necesidad se pueden utilizar como patrones los instrumentos junto con transformadores de medición. Los transformadores deben ser de clase de error correspondiente a la clase del instrumento patrón.

Las fuentes y los dispositivos de regulación que se utilizan para verificación de instrumentos deben tener características que permitan una regulación lineal, o escalonada en pequeños escalones.

Los valores de errores del instrumento son válidos cuando el instrumento trabaja en condiciones nominales. Las condiciones nominales son las siguientes:

1. La temperatura de ambiente debe ser de 20 °C. Cuando el instrumento está destinado para funcionar en otras temperaturas, éstas deben figurar sobre el cuadrante.

2. La frecuencia para instrumentos de corriente alterna debe estar comprendida entre 45 y 53 Hz o entre 55 y 63 Hz. La tolerancia, durante la prueba, puede ser hasta $\pm 2\%$ del valor nominal de la frecuencia indicada.

3. La posición del instrumento durante la prueba debe concordar con la posición indicada sobre el cuadrante. Cuando el instrumen-

to no trae indicación de posición, se debe verificar en dos posiciones: horizontal y vertical.

4. La verificación del instrumento se debe efectuar sin la influencia de campos magnéticos externos, a excepción del campo terrestre. Los instrumentos de tablero se deben verificar colocados en un tablero metálico de espesor indicado. Cuando en el cuadrante figura el símbolo "Fe" el tablero debe tener un espesor de $3 \pm 0,5$ mm.

5. La onda de la corriente alterna que se utilice para la verificación de instrumentos de corriente alterna no debe presentar deformaciones. Para comprobar si la fuente no suministra una señal deformada se puede emplear un método simple de dos voltímetros. Uno, electromagnético o electrodinámico, indicará el valor eficaz y, el otro, magnetoeléctrico de corriente continua conectado a un rectificador de onda completa, indicará el valor medio. Dividiendo el valor eficaz indicado por el primer voltímetro por el valor medio indicado por el segundo voltímetro se obtiene el factor de forma, el cual en el caso de no existir deformación alguna debe ser 1,111, que corresponde a una señal sinusoidal pura. Se puede admitir una deformación de la onda para la cual el factor de forma no difiera en 5 % de su valor nominal.

El error se debe determinar para todas las divisiones numeradas. En caso de duda deben verificarse también las divisiones no numeradas. Durante la prueba se ajusta la tensión para que la aguja del instrumento verificado indique la señal cifrada y se toma lectura del valor real que indica el instrumento patrón. Un ejemplo de la ficha de contraste se muestra en la página siguiente.

En las observaciones debe siempre figurar la fórmula con la cual está calculado el error relativo δ (ver el apartado *Errores* del capítulo III).

Verificación de instrumentos magnetoeléctricos

Antes de realizar la verificación de un instrumento, deben tomarse en cuenta tres factores principales: *a)* fuente de alimentación del circuito; *b)* sistema de regulación durante la operación, y *c)* tipo y clase del patrón.

a) La fuente de alimentación debe caracterizarse por su estabilidad y por la posibilidad de suministrar las intensidades y las tensiones requeridas. Lógicamente, éstas dependen del alcance del instrumento verificado. Por lo general, para la verificación de amperímetros de corriente continua se utilizan acumuladores como fuente. El acumulador cumple a la perfección con las exigencias mencionadas y su único inconveniente es la necesidad de un mantenimiento periódico. Muy buenos resultados se obtienen con baterías de automóvil

Instrumento:

Marca:

Nº:

Fecha:

Temperatura del ambiente: ° C

1. Nº	2. Alcance I _{max}	3. I _X	4. I _P	5. Δ	6. δ	OBSERVACIONES
	A	A	A	A	%	
1						Fórmula empleada: $\delta_{\%} = \frac{I_X - I_P}{I_{max}} \cdot 100$
2						
1						
1						
n						

provistas de bornes adicionales de salida de cada elemento. Para alimentación de circuitos de tensión (voltímetros) se utilizan generadores de corriente continua o rectificadores. Los rectificadores que se utilizan en verificación de instrumentos deben caracterizarse por un bajo valor del factor de rizado.

b) Para la regulación de la tensión o de la corriente se deben elegir esquemas y dispositivos que permitan una regulación lineal y exacta. Los valores de resistencias variables empleadas como reostatos o como divisores de tensión deben estar en concordancia con las resistencias de los instrumentos verificados y patrones.

c) En calidad de instrumentos patrones se utilizan instrumentos magnetoeléctricos tipo laboratorio. La clase de exactitud (ver capítulo III) del patrón debe ser superior a la del instrumento verificado. El patrón debe superar en dos clases la clase de exactitud del instrumento verificado. *Ejemplo:* Para verificar un instrumento de clase 1, el patrón debe ser de clase 0,2. Igualmente, para verificar un instrumento de clase 2,5, el patrón que se utiliza es de clase 0,5.

Los instrumentos diseñados para funcionar con elementos adicionales tales como los shunt o como las resistencias adicionales no intercambiables, se verifican en conjunto con sus elementos adicionales. Por lo general, este tipo de instrumento tiene escala graduada en conjunto con su shunt o con su resistencia adicional. Los amperí-

metros que tienen los shunt intercambiables se verifican como milivoltímetros y los voltímetros con las resistencias adicionales intercambiables como miliamperímetros. Para la verificación de este tipo de instrumentos se toma como referencia la caída de tensión o la intensidad nominal cuyo valor figura en el cuadrante. En ambos casos, los errores se determinan en base a las magnitudes directas, o sea, para amperímetros en milivoltios y para voltímetros en miliamperios.

A continuación se muestran esquemas típicos utilizados para la verificación de amperímetros y voltímetros magnetoeléctricos.

La figura XI-1 muestra un esquema del circuito más apropiado para la verificación de milivoltímetros magnetoeléctricos. El circuito está constituido por dos divisores de tensión R_1 y R_2 conectados en cascada. El mejor resultado de regulación se obtiene cuando la relación entre las dos resistencias se acerca a 10. *Ejemplo:* $R_1 = 300 \Omega$, $R_2 = 30 \Omega$. Con la resistencia de valor mayor se efectúa la regulación aproximada y con la otra se afina la lectura. Los conductores a , con los cuales el milivoltímetro está conectado, deben estar incluidos (la resistencia del milivoltímetro es pequeña). La figura XI-2 es una va-

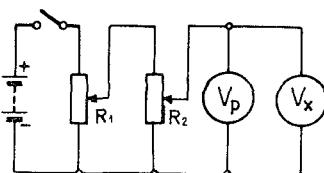


Figura XI-1.

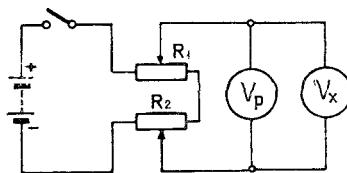


Figura XI-2.

riante en la cual el divisor de tensión está constituido por dos resistencias R_1 y R_2 conectados en serie a la fuente. Una de las resistencias tiene un valor 10 veces mayor que la otra, de manera que con un cursor se hace el ajuste aproximado y con el otro el ajuste fino. Este sistema es apropiado para verificación de voltímetros de baja tensión.

Para la verificación de voltímetros de mediana tensión se emplea el esquema de la figura XI-3. En este caso la fuente de alimentación puede ser un generador de corriente continua o mucho más frecuente una fuente de energía. La regulación se efectúa utilizando un divisor de tensión R_1 y un reostato R_2 . El valor de la resistencia del divisor se calcula en base a la tensión de entrada y el valor de la resistencia del reostato, en base a la resistencia equivalente de dos voltímetros (verificado y patrón) conectados en paralelo. La mejor regulación se ob-

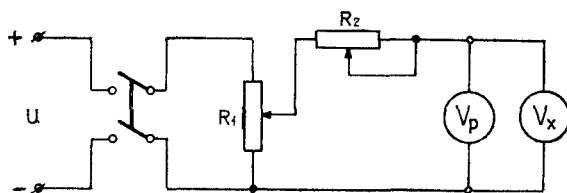


Figura XI-3.

tiene cuando la resistencia R_2 tiene un valor aproximadamente igual a la resistencia equivalente .

La figura XI-4 muestra el esquema que se utiliza en la verificación de miliamperímetros. El circuito está compuesto por tres resistencias. La resistencia R_1 (divisor) regula la tensión de alimentación y la resistencia R_2 afina la intensidad de corriente. La resistencia R_3 es la resistencia de seguridad; se la calcula para que en un caso extremo (R_1 en la máxima posición del cursor y R_2 cortocircuitada) la intensidad de corriente no sobrepase el valor de máxima desviación de cualquiera de los dos miliamperímetros.

En la figura XI-5 se observa un circuito de conexiones apropiado para utilizarlo en la verificación de amperímetros magnetoeléctricos.

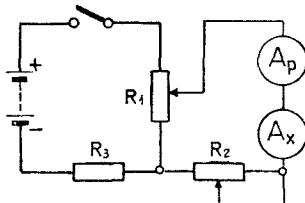


Figura XI-4.

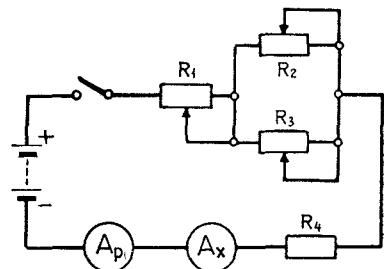


Figura XI-5.

Las resistencias R_1 , R_2 y R_3 son de regulación y la resistencia R_4 (fija) es limitadora. El valor de esta resistencia se calcula de igual manera que la resistencia R_3 de la figura XI-4. La relación entre los valores de las resistencias R_2 y R_3 debe oscilar entre 5 y 10 para asegurar una regulación fina y constante. La resistencia R_1 es de bajo valor y sirve para llegar a una primera aproximación.

Verificación de instrumentos magnetoeléctricos con rectificador

Los instrumentos magnetoeléctricos con rectificador están destinados para mediciones de tensiones y de corrientes en circuitos de corriente alterna. El inconveniente que se presenta con este tipo de instrumentos es que sus indicaciones dependen de la forma de la onda de la tensión o de la corriente. En consecuencia, es imprescindible, durante la verificación, utilizar fuentes y dispositivos, que en conjunto no originan deformación apreciable de la onda. El factor de forma no debe diferir más que en uno por ciento de su valor nominal (1,111). Estas exigencias se deben a la característica particular de la rectificación y el instrumento magnetoeléctrico con rectificador reacciona al valor medio $\left(\frac{2}{\pi}\right)$, mientras por lo general, su escala está graduada en valores eficaces $\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)$. El error que se puede producir en casos de una onda deformada, puede llegar hasta un valor de 10 %. Como instrumentos patrones en la verificación de instrumentos con rectificador, se emplean instrumentos electrodinámicos o electromagnéticos. La frecuencia nominal de los patrones debe concordar con la frecuencia nominal de los instrumentos verificados.

La figura XI-6 muestra un circuito que se utiliza para verificación de voltímetros con rectificador. El circuito consta de un auto-

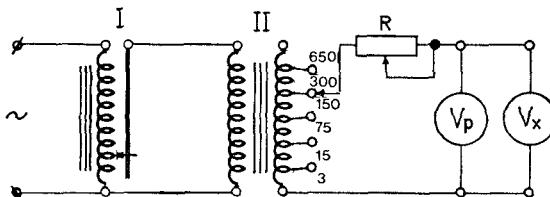


Figura XI-6.

transformador de relación variable I , de un transformador de varias tensiones secundarias II y de una resistencia variable R . Se escoge una de las salidas del transformador II seleccionando el margen requerido de tensión. La primera aproximación se obtiene por medio del autotransformador variable I y luego la lectura se afina utilizando la resistencia variable R . El valor de la resistencia variable a utilizar se calcula en base al valor equivalente de las resistencias de ambos voltímetros (verificado y patrón) conectados en paralelo. En el caso de

variaciones de la tensión de red que alimenta al circuito se debe intercalar un estabilizador.

Los miliamperímetros y amperímetros con rectificador se verifican conectándolos según el circuito de la figura XI-7. El esquema es similar al anterior con la diferencia en las características del transformador de salida II. El transformador tiene que suministrar tensiones

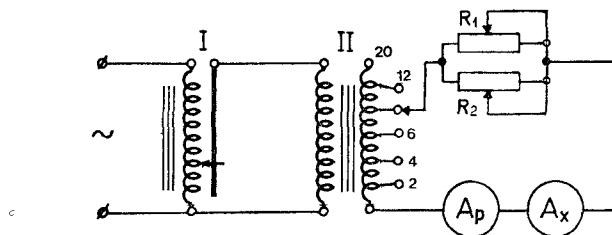


Figura XI-7.

bajas para alimentar un circuito de pequeña resistencia, pero en cambio, las intensidades requeridas son altas según los alcances de amperímetros verificados.

Verificación de instrumentos electromagnéticos

Aunque los instrumentos electromagnéticos se utilizan generalmente para mediciones e intensidades en corriente alterna, sirven también para efectuar mediciones en corriente continua. En corriente continua indican con un error diferente que en corriente alterna, ya que tienen otras fuentes de error (histéresis). Su verificación se hace de acuerdo con el uso previsto en cada caso, corriente alterna o corriente continua. En el caso de ser contrastados como universales (ambas corrientes) deben llevar dos indicaciones de error, una válida para el uso en corriente alterna y la otra para el uso en corriente continua. Algunos tienen dos escalas, una para lecturas en alterna y la otra para continua. En consecuencia, cuando se trata de un instrumento electromagnético para ambas corrientes se lo debe verificar en ambos sistemas. La verificación en corriente continua se hace de la misma manera como la de los instrumentos magnetoeléctricos. Por tanto, a continuación se describen solamente esquemas que se utilizan en la verificación de estos instrumentos en corriente alterna.

La figura XI-8 muestra el esquema de conexiones que se utiliza en la verificación de voltímetros electromagnéticos. Como se puede apreciar en la figura se emplean dos autotransformadores de relación regulable I y II, conectados en cascada. La salida del segundo autotransformador está conectada al primario de un transformador III,

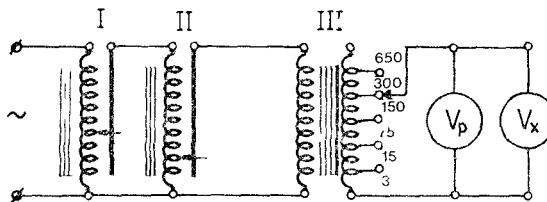


Figura XI-8.

cuyo secundario tiene varias derivaciones. La tensión secundaria del transformador III, se selecciona para que suministre una tensión correspondiente al alcance del voltímetro verificado, cuando los cursores de ambos autotransformadores I y II estén en la posición de la máxima tensión de salida.

Los voltímetros destinados para funcionar conjuntamente con transformadores de tensión se verifican sin el transformador, o sea, como voltímetros directos. Por lo general, estos voltímetros tienen el alcance real de 100 V, ya que ésta es la tensión nominal secundaria de los transformadores de tensión. En el caso de ser la escala del voltímetro graduada a la relación prevista del transformador, se calcula la tensión del voltímetro correspondiente a cada división cifrada y se lo verifica según las tensiones calculadas.

Los amperímetros electromagnéticos se verifican en un circuito similar al utilizado en verificación de voltímetros (fig. XI-9), con la diferencia en características del transformador de salida III. La ten-

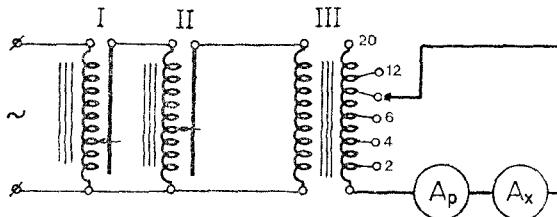


Figura XI-9.

sión de salida es baja, pues tiene que cubrir únicamente las caídas debidas a las impedancias de los dos amperímetros (verificado y patrón) y se la selecciona de la misma manera que en el caso de verificación de voltímetros. En la máxima posición de los cursores de ambos autotransformadores (*I* y *II*), la tensión de alimentación debe producir la intensidad de corriente correspondiente al alcance de amperímetros.

Por lo general, los amperímetros que se utilizan en calidad de patrones son de alcances bajos (5 a 10 A). Cuando se verifican amperímetros electromagnéticos directos de alcances mayores que el alcance del instrumento patrón se emplean transformadores de intensidad. El transformador de intensidad que se usa en conjunto con el cir la intensidad de corriente correspondiente al alcance de los ampe tra el esquema de conexiones que se utiliza en estos casos.

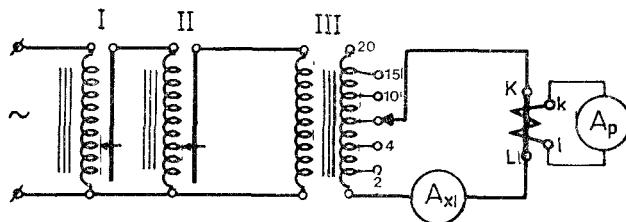


Figura XI-10.

Verificación de instrumentos electrodinámicos

Los instrumentos electrodinámicos se utilizan para mediciones tanto en corriente continua como en corriente alterna. Como es sabido, existen dos tipos de instrumentos electrodinámicos, sin núcleo y ferrodinámicos. Los primeros indican igual en ambos sistemas de corriente; en cambio, los ferrodinámicos, debido a la existencia de núcleos ferrosos, indicarán con diferentes errores según se los utilice con corriente alterna o continua. En consecuencia, se deben verificar por separado en ambos sistemas de corriente. Para la verificación de amperímetros y voltímetros electrodinámicos en corriente continua se utilizan los esquemas y el método de verificación de instrumentos magnetoeléctricos y en corriente alterna los de los instrumentos electromagnéticos. Los vatímetros electrodinámicos en los cuales el sistema electrodinámico es de mayor aplicación, se verifican de dos maneras: 1) con corriente continua utilizando como patrones el amperímetro y el voltímetro y 2) con corriente alterna utilizando un vatímetro patrón.

La figura XI-11 muestra la conexión del vatímetro cuando se mide potencia. Si quisieramos emplear este circuito para verificar el vatímetro se presentarían varios inconvenientes. En primer lugar, hay que mantener una tensión constante y de valor nominal correspondiente

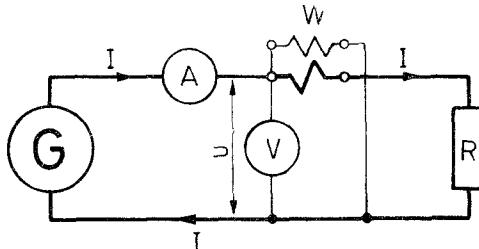


Figura XI-11.

a la tensión nominal del vatímetro. En segundo lugar, habría que disponer de un receptor de potencia variable que permita la regulación lineal de la intensidad. Además este método requiere un gasto de energía que en casos de potencias grandes (kilovatímetros) presentaría un gasto innecesario. Para evitar estos inconvenientes y para disponer de una regulación exacta e independiente en ambos circuitos, de tensión y de intensidad, se utiliza para la verificación de vatímetros un método denominado "método de carga ficticia". Este consiste en la utilización de dos fuentes: una para aplicar la tensión nominal a la bobina de tensión del vatímetro y la otra para hacer circular la corriente por la bobina de intensidad.

Utilizando este método se obtiene el efecto de utilizar una potencia que corresponde al producto de la tensión por la intensidad. La figura XI-12 muestra el circuito de conexiones correspondiente. Una fuente de baja tensión (E_1), que puede suministrar las intensidades requeridas por la bobina de intensidad del vatímetro, alimenta el circuito de intensidad compuesto por la bobina de intensidad del vatímetro, el amperímetro patrón y las resistencias R_1 y R_2 . La fuente (E_2), a través de un divisor de tensión R , alimenta el circuito de tensión compuesto por la bobina de tensión del vatímetro y el voltímetro patrón. Ambos circuitos, de tensión y de intensidad, se regulan por separado permitiendo obtener una regulación precisa de intensidad y de tensión. Para calcular el error se considera como potencia real la obtenida del producto de lecturas del amperímetro y del voltímetro

$$\delta \% = \frac{P - U \cdot I}{P_{\max}} \cdot 100 = \frac{P - U \cdot I}{U_{\text{nom}} \cdot I_{\text{nom}}} \cdot 100$$

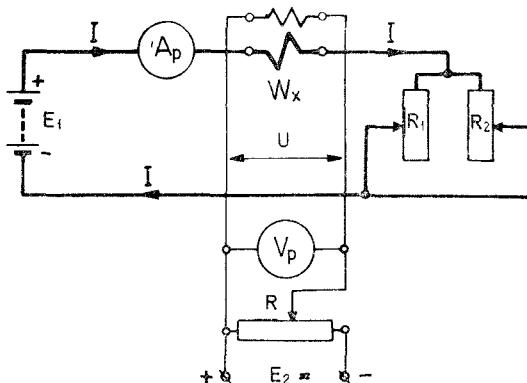


Figura XI-12.

P es la potencia acusada por el vatímetro verificado,
 U es la tensión que indica el voltímetro patrón,

I es la intensidad que indica el amperímetro patrón,

$P_{\max} = U_{\text{nom}} \cdot I_{\text{nom}}$ es la potencia obtenida del producto de alcances de intensidad y de tensión del vatímetro verificado.

Una vez verificado el vatímetro con corriente continua se procede a su verificación con corriente alterna. Esta prueba permite establecer errores con los cuales el vatímetro indicará potencia con varios factores de potencia ($\cos \varphi$).

El circuito correspondiente a esta verificación está ilustrado en la figura XI-13. Como se puede apreciar, se sigue el mismo método de

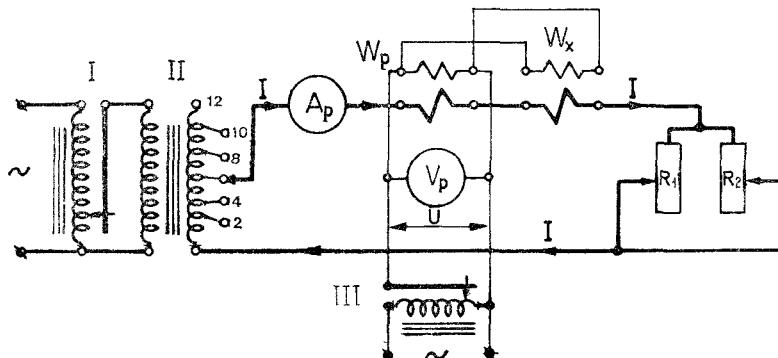


Figura XI-13.

carga ficticia que en el circuito anterior, es decir, aplicando dos circuitos independientes, de tensión y de intensidad. El circuito de intensidad está alimentado por un transformador *II* de varias salidas de baja tensión. Al primario de este transformador está conectado el autotransformador variable *I*. El amperímetro patrón, la bobina de intensidad del vatímetro patrón y la bobina de intensidad del vatímetro verificado están conectados en serie; las resistencias R_1 y R_2 se utilizan para regulación fina de la intensidad de corriente. El circuito de tensión formado por las bobinas de tensión de los vatímetros W_p y W_x y por el voltímetro patrón conectados en paralelo están alimentados por un autotransformador de relación variable *III*. El autotransformador *III* se puede conectar a un desfasador (no aparece en la figura) y, utilizándolo, obtener desfases de tensión con respecto a la intensidad en el circuito de intensidad. El conjunto se controla por medio de 3 instrumentos patrones, o sea, el vatímetro (W_p), el amperímetro (A_p) y el voltímetro (V_p). El factor de potencia que aparece se calcula por

$$\cos \varphi = \frac{P_p}{U_p \cdot I_p}$$

Para verificar el vatímetro W_x se comparan sus lecturas con las lecturas del vatímetro patrón para distintos $\cos \varphi$ (0; 0,5 y 1). El error se calcula por

$$\delta \% = \frac{P_x - P_p}{P_{x(\max)}} \cdot 100$$

donde

P_x es la potencia indicada por el vatímetro verificado

P_p es la potencia indicada por el vatímetro patrón

$P_{x(\max)} = U_{p \text{ nom}} \cdot I_{p \text{ nom}}$ es el alcance del vatímetro verificado.

Determinación de parámetros de galvanómetros

El galvanómetro, cualquiera que sea su tipo, es un instrumento de máxima sensibilidad y precisión y también de uso múltiple. Como ya se ha mencionado anteriormente, el galvanómetro es simplemente un sistema indicador al cual se conecta un traductor que permite utilizarlo en detección de tensiones, intensidades o cargas eléctricas. La verificación de un galvanómetro se reduce a la determinación de sus constantes en condiciones nominales y requiere exactitud y paciencia. Antes de empezar estos trabajos se deben tomar las medidas que aseguren la obtención de resultados correctos de las mediciones base

a las cuales se determinarán los parámetros buscados. Estas medidas se pueden ordenar de la siguiente manera:

1. Colocación del galvanómetro a níquel sobre una base firme (mesón, soporte, etc.) que asegure su aislamiento a las vibraciones. En algunos casos se requiere un fundamento especial aislado del edificio. En caso de necesidad se pueden disminuir las vibraciones exteriores colocando el galvanómetro sobre una placa maciza apoyada sobre una capa de goma esponjosa.
2. Verificación del sistema óptico realizándose ajustes hasta obtener sobre la escala una imagen nítida de la línea negra trazada sobre el espejo.
3. El plano de la escala debe ser perfectamente paralelo al plano del espejo del galvanómetro.
4. Se comprueba el funcionamiento de la traba de la bobina móvil.
5. Se comprueba durante las oscilaciones libres la simetría de las desviaciones en ambos sentidos y el retorno de la imagen proyectada sobre la escala a la posición inicial (cero).
6. Se comprueba el funcionamiento del corrector. Este debe permitir un desplazamiento de la señal luminosa sobre la escala no menor de 1 m.

Los parámetros que se deben determinar antes de utilizar un galvanómetro son los siguientes: *a)* la resistencia interna del galvanómetro; *b)* el período de oscilación libre T_0 ; *c)* la resistencia crítica; *d)* la constante de intensidad; *e)* la constante de tensión; *f)* la constante balística (en el caso de un galvanómetro balístico).

Los parámetros de un galvanómetro se pueden determinar empleando el circuito representado por el esquema de la figura XI-14. La fuente *E* es una pila de 1,5 V o un acumulador de 2,0 V. Con el

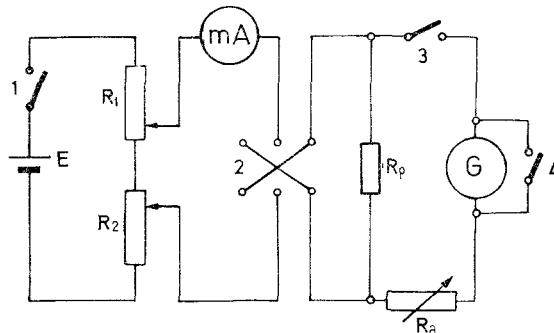


Figura XI-14.

interruptor (1) se conecta la fuente a las dos resistencias R_1 y R_2 conectadas en serie de manera que actúan como un divisor de tensión. La regulación más apropiada se obtiene cuando la relación entre ambas resistencias $\left(\frac{R_1}{R_2}\right)$ es igual a 10. La tensión que se toma del divisor hace circular la corriente I a través de una resistencia patrón R_p . La corriente I es medida con el miliamperímetro y puede ser invertida mediante el conmutador (2). El galvanómetro en serie con una resistencia variable en décadas es conectado a los extremos de la resistencia patrón R_p mediante el interruptor (3). Los bornes del galvanómetro se pueden cortocircuitar con el interruptor (4) para los efectos de amortiguación del instrumento. La resistencia adicional R_a es una resistencia calibrada, en décadas de 5 o 6 escalones. El miliamperímetro que se utiliza en este circuito debe ser de la clase de exactitud 0,2 o 0,5. El valor de la resistencia patrón depende del tipo y de la resistencia interna del galvanómetro. Cuando la resistencia interna del galvanómetro es alta y la resistencia crítica es del orden de los 1.000 ohmios, la resistencia patrón $R_p = 1,0$ ohmio. Para la determinación de los parámetros de galvanómetros de resistencia interna pequeña cuya resistencia crítica es del orden de decenas de ohmios se utiliza la resistencia patrón $R_p = 0,1 \Omega$.

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA INTERNA DEL GALVANÓMETRO

La resistencia interna del galvanómetro se puede determinar con dos métodos: 1) midiendo la resistencia con un puente (Wheatstone) o con un sensible óhmetro y 2) con método de desviaciones propias. Al emplear el primer método, o sea, midiendo la resistencia con un puente o con un instrumento, se debe prestar mucha atención para no dañar el galvanómetro durante la medición, para lo cual debemos limitar la intensidad de corriente que circule a través del galvanómetro. Esta intensidad nunca debe sobrepasar 1 mA. Antes de efectuar la medición se debe trabar el sistema móvil con la traba provista, pues una desviación violenta puede dañar la suspensión. Al medir la resistencia del galvanómetro con un puente y cuando resulta imposible trabar la parte móvil, se debe ajustar el cuadripolo formado por el puente, de tal modo que la resistencia exterior del galvanómetro esté comprendida entre 1 % y 10 % de la resistencia crítica. Cuando se mide la resistencia con un óhmetro se debe colocar al galvanómetro un shunt. Este shunt debe tener un valor de 1 % de la resistencia crítica, aproximadamente.

El segundo método, o sea, de desviaciones propias es más conveniente y más cómodo. Para emplear este método se utiliza el esque-

ma de la figura XI-14. La medición se efectúa tomando dos distintas desviaciones del galvanómetro (α_1 y α_2) con dos valores distintos de la resistencia adicional (R_{a1} y R_{a2}). Durante la medición se mantiene la intensidad I de valor constante regulando las resistencias del divisor (R_1 y R_2).

La primera desviación α_1 está originada por

$$I_{g1} = \frac{I \cdot R_p}{R_p + R_{a1} + R_g} = \frac{U_p}{R_p + R_{a1} + R_g}$$

La segunda desviación α_2 está originada por

$$I_{g2} = \frac{I \cdot R_p}{R_p + R_{a2} + R_g} = \frac{U_p}{R_p + R_{a2} + R_g}$$

Relacionando las dos desviaciones, tenemos

$$\frac{I_{g1}}{I_{g2}} = \frac{R_p + R_{a2} + R_g}{R_p + R_{a1} + R_g}$$

Siendo $R_p \gg R_g$ puede simplificar

$$\frac{I_{g1}}{I_{g2}} = \frac{R_{a2} + R_g}{R_{a1} + R_g} \quad \dots \dots \dots \text{a}$$

La desviación del galvanómetro es proporcional a I_p , y por tanto

$$\frac{I_{g1}}{I_{g2}} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \quad \dots \dots \dots \text{b}$$

Resolviendo las dos ecuaciones *a* y *b* se obtiene el valor de la resistencia interna del galvanómetro:

$$R_g = \frac{\alpha_2 \cdot R_{a2} - \alpha_1 \cdot R_{a1}}{\alpha_1 - \alpha_2}$$

DETERMINACIÓN DEL PERÍODO DE OSCILACIÓN LIBRE T_0

Para determinar el periodo de oscilación libre se utiliza el esquema de la figura XI-14. Se regulan las resistencias del divisor (R_1 y R_2) para obtener una desviación de 100 a 200 divisiones sobre la escala del galvanómetro. Luego, se abre el circuito del galvanómetro utilizando el interruptor (3) y, en consecuencia, el galvanómetro empieza a oscilar. La señal luminosa sobre la escala oscila desde una desviación máxima hacia la otra desviación máxima pasando por cero. En el instante de pasar por cero de la escala se hace funcionar el cronó-

metro y se cuenta 10 oscilaciones completas. Dividiendo el tiempo que duran diez oscilaciones se obtiene el tiempo de duración de una oscilación. Este tiempo se toma como período de oscilación libre T_0

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA CRÍTICA EXTERIOR

La resistencia con la cual se debe cerrar el circuito del galvanómetro para que el movimiento de la parte móvil cambie su carácter de periódico en aperiódico se denomina resistencia crítica exterior del galvanómetro R_{cr} . Para obtener este valor se regula y ajusta la resistencia adicional en décadas R_a (fig. XI-14). Al iniciar el experimento la resistencia adicional R_a debe tener un valor cualquiera con el cual, al obtener una desviación del galvanómetro (interruptor 3 y conmutador 2 cerrados) y luego al abrir el conmutador 2, la señal sobre la escala oscila periódicamente. Luego, se disminuye paulatinamente la resistencia adicional R_a , repitiendo en cada paso la desconexión del conmutador 2 hasta obtener un estado en el cual la señal luminosa después de alcanzar la máxima amplitud, retorna a cero quedando en esta posición (sin oscilar).

El valor obtenido de la suma de la resistencia en década R_a intercalada con la resistencia patrón R_p es el valor de la resistencia crítica exterior del galvanómetro

$$R_{cr} = R_a + R_p$$

La resistencia crítica total es igual a la suma de las tres resistencias, o sea, de la resistencia adicional R_a , de la resistencia patrón R_p y de la resistencia interna del galvanómetro R_g . Por lo general, la resistencia patrón R_p es muy pequeña en comparación con la resistencia adicional y, por tanto, no se la toma en cuenta. Se asume que el valor de la resistencia adicional R_a intercalada, con la cual el galvanómetro no oscila, es la resistencia crítica exterior.

DETERMINACIÓN DE LAS CONSTANTES DE INTENSIDAD Y DE TENSIÓN

El mismo circuito de la figura XI-14 sirve para determinar las constantes de intensidad y de tensión. Para calcular la constante de intensidad se mide la intensidad de corriente I_g que circula por el milliamperímetro patrón y luego se calcula la intensidad de corriente I_g que circula por el galvanómetro. La intensidad de corriente I_g origina una desviación de la señal luminosa de a divisiones sobre la escala. La constante de intensidad C_I será:

$$C_I = \frac{I_g}{a} \quad (\text{A/mm})$$

Este valor de la constante es válido cuando la distancia entre la escala y el espejo del galvanómetro es de 1 metro. Cuando la distancia real (o la equivalente en un sistema óptico complejo de galvanómetros portátiles) es de l metros, la constante será:

$$C_I = \frac{I_g}{a} \cdot l$$

Para obtener estos valores se procede ajustando la resistencia adicional en décadas R_a al valor correspondiente a la resistencia crítica y después, utilizando las resistencias divisoras R_1 y R_2 , se busca una desviación de galvanómetro α_1 de uno de los lados del cero de la escala. Luego, sin variar el valor de la corriente se invierte su sentido mediante el conmutador (2) obteniendo de este modo la desviación α_2 del otro lado del cero de la escala. Se calcula a como un valor medio de ambas desviaciones,

$$a = \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}$$

Cuando el miliamperímetro patrón indica I_1 amperios, la intensidad de corriente I_g que circula por el galvanómetro es

$$I_g = \frac{I_1 \cdot R_p}{R_p + R_a + R_g}$$

Sustituyendo el valor de la intensidad I_g en la fórmula obtenemos finalmente

$$C_I = \frac{I_g}{a} = \frac{\frac{I_1 \cdot R_p}{R_p + R_a + R_g}}{\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}} = \frac{2I_1 \cdot R_p}{(\alpha_1 + \alpha_2)(R_p + R_a + R_g)} \quad (\text{A/mm})$$

La constante de intensidad se determina con tres valores distintos de a comprendidos entre: 20 a 30; 50 a 60 y 80 a 100 % de la longitud de la escala. Luego, calculando el valor promedio de los tres resultados, se obtiene el valor de la constante C_I que se utilizará con el galvanómetro.

La constante de tensión C_U se calcula en base a la constante de intensidad

$$C_U = C_I \cdot (R_g + R_{\text{ext}}) \quad (\text{V/mm})$$

DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTE BALÍSTICA DE GALVANÓMETROS BALÍSTICOS

Para el experimento de determinación de la constante balística se

utiliza el esquema de la figura XI-15. La fuente E es una fuente de corriente continua cuya tensión permite cargar el condensador C_p . El condensador C_p es un condensador patrón de capacidad conocida. El commutador (2) tiene dos posiciones: una para cargar el condensador C_p y la otra para conectarlo al circuito del galvanómetro balístico.

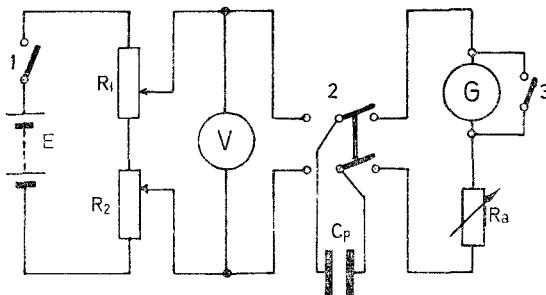


Figura XI-15.

Una vez cargado el condensador se descarga a través del galvanómetro tomando la lectura de la amplitud de la primera oscilación, la cual es proporcional a la carga del condensador

$$Q = C_b \cdot \sigma_1$$

La constante balística se puede calcular en base a esta ecuación:

$$C_b = \frac{Q}{\sigma_1} = \frac{C_p \cdot U}{\sigma_1}$$

La constante balística determinada de esta manera es válida para un determinado grado de amortiguamiento, lo que depende del valor de la resistencia adicional R_a . Al variar el valor de la resistencia adicional se debe repetir el procedimiento para determinar la constante balística nuevamente.

BIBLIOGRAFIA DEL 1.er TOMO

- E. W. GOLDING & F. C. WIDDIS: *Electrical measurements and measuring instruments.* Londres, 1963, Sir Isaac Pitman & Sons, Ltd.
- S. LEBSON: *Elektryczne przyrzady pomiarowe.* Varsovia, 1966, WNT.
- R. B. MARSHALL: *Measurements in electrical engineering.* Purdue University, Indiana.
- A. PALM: *Elektrische Messgeräte und Messeinrichtungen.* Berlin, 1963, Springer.
- M. F. WLASOW, S. M. PIGIN, W. I. CZERWIAKOWA: *Montaż i Regulacja Elektrycznych Przyrządów Pomiarowych.* Moscú, traducción Varsovia, 1966, W.N.T.
- M. B. STOUT: *Basic electrical measurements.* Nueva Jersey, 1962, Prentice-Hall Inc.
- M. LAPINSKI: *Miernictwo Elektryczne.* Varsovia, 1967, W.N.T.
- HARTMANN & BRAUN, Mess-und Regeltechnik: Catálogos y publicaciones varias. Frankfurt/M. y São Paulo, 1971, 1972, 1973.
- TINSLEY & Co. LTD. Scientific instruments manufacturers: Catálogos y publicaciones varias. Londres, 1969-1972.
- AOIP MESURES: Catálogos y publicaciones varias. París, 1967-1972.
- YOCOGAWA ELECTRIC WORKS, LTD.: Catálogos. Tokio, 1972-1973.
- W. MICHELS: *Electrical measurements and their applications.* Nueva Jersey, 1957, D. Van Nostrand Co. Inc.
- A. W. SMITH & M. L. WIEDENBECK: *Electrical measurements.* Nueva York, 1959, McGraw-Hill Co. Inc.
- ELIMA GMBH: Elima Handbuch *Elektrische Einbau-Instrumente.* Frankfurt/M, 1965.