BIBLIOTECA DEL ELECTRICISTA PRÁCTICO

REÓSTATOS INDUSTRIALES

EDITOR 10 BARCELONA

REÓSTATOS INDUSTRIALES

BIBLIOTECA DEL ELECTRICISTA PRÁCTICO

SERIE PRIMERA (Volúmenes 1 a 30)

PUBLICADA BAJO LA DIRECCIÓN
DE

D. RICARDO CARO Y ANCHÍA

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

TOMO X

REÓSTATOS INDUSTRIALES

— POR —

D. RICARDO CARO Y ANCHÍA

SEGUNDA EDICIÓN

«CALPE»

Compañía Anónima de Librería, Publicaciones y Ediciones

MADRID-BARCELONA

Imprenta Elzeviriana - Calle de Torres Amat, 9 · Barcelona

CAPÍTULO PRIMERO

Resistencias y conductancias

Resistencia eléctrica. — La corriente eléctrica, al recorrer los diversos cuerpos que constituyen un circuito cerrado, encuentra en todos ellos alguna dificultad, mayor o menor, para su circulación. Esta dificultad es lo que se llama *resistencia eléctrica.*

No hay cuerpo alguno que sea perfecto conductor de la corriente, es decir, no hay cuerpos de resistencia nula.

Atendiendo a esta cualidad, se clasifican los cuerpos en *buenos conductores, conductores resistentes, y aisladores.* y de entre ellos se escogen unos u otros, según el fin que se persiga con su empleo en el circuito eléctrico.

Son buenos conductores los metales, y, entre ellos, sobre todo, la plata y el cobre. Son conductores resistentes algunas aleaciones metálicas, como el mélchior, la kruppina, etc., las disoluciomes salinas y algunos metaloides. Son aisladores, el vidrio, la porcelana, el mármol, etc., y algunos productos industriales conocidos con los nombres de fibra, ebonita, etc.

Cuando se trata de llevar la energía eléctrica de un punto a otro, del punto de producción al lugar de consumo, por ejemplo, interesa establecer un circuito lo menos resistente posible, y por eso vemos las líneas de transmisión y de distribución construídas de cobre a pesar de su elevado precio. En cambio, si en un circuito interesa poner alguna dificultad a la corriente, para limitar su intensidad, empleamos los conductores resistentes, el hierro, el carbón, los líquidos. Finalmente, cuando se pretende evitar toda pérdida de corriente, se recurre a los aisladores, como sucede en los soportes en que apoyamos los conductores de las líneas.

Hemos dicho que no hay cuerpo alguno que posea una conductividad perfecta, y podemos decir otro tanto de los aisladores. *No hay cuerpos perfectamente aisladores.* Pudieron creerse perfectos aisladores algunos cuerpos, mientras no se manejaban las enormes tensiones que hoy se emplean. Actualmente es fácil comprobar que con los miles y miles de voltios de que disponemos, la corriente pasa a través de gruesas masas de porcelana, por esmerada que sea su preparación y bien pensada su forma como aislador. Algo de esto hemos de estudiar en alguno de los tomos siguientes de esta BIBLIOTECA.

Unidad de resistencia. — La medición y el cálculo de las resistencias imponen la necesidad de fijar una unidad que sirva de tipo de comparación. En los primeros tiempos de la telegrafía, antes de celebrarse los congresos de electricistas, a los cuales tanto debe la ciencia, se tomaba como unidad de resistencia la de un kilómetro de línea telegráfica formada por alambre de hierro de 4 milímetros de diámetro. Todavía en algunos antiguos aparatos Morse y Breguet, hemos encontrado carretes calibrados en estas unidades, con las inscripciones «6 kilómetros», «10 kilómetros», etc.

Al establecerse el sistema cegesimal de unidades eléctricas, que con todo detalle hemos estudiado en el tomo II, se creó *el ohmio*, como unidad práctica de resistencia eléctrica, perpetuando con su nombre el recuerdo del eminente físico Ohm.

Fijada la unidad, era preciso establecer también un patrón de resistencia igual a la unidad, y que fuese fácil de construir en cualquier momento, con seguridad completa de su exactitud.

Si este patrón había de ser metálico, se pensó inmediatamente en el mercurio, por la mayor facilidad de obtenerlo puro, cosa no tan fácil con los metales sólidos.

Para reproducir el ohmio, se forma una columna de mercurio, en el interior de un tubo de vidrio de manera que su sección sea constantemente un milímetro cuadrado y se opera a cero grados de temperatura.

Respecto a la longitud de esta columna de mercurio, en 1884 se fijó en 106 centímetros, constituyéndose el *ohmio legal*. En 1893, a continuación del congreso de Chicago, se hicieron nuevos experimentos y se fijó la longitud de la columna de mercurio en 106'3, dándose a este patrón el nombre de *ohmio internacional*.

Resistividad. — Para juzgar las cualidades de una substancia cualquiera como conductor eléctrico, se fija su resistencia específica o resistividad.

Resistividad o resistencia específica de una substancia cualquiera es la resistencia que opone al paso de la corriente, un cubo construído de esta substancia, que tenga por arista la unidad lineal. En esta definición se supone que la corriente entra en el cubo por toda la superficie de una cara y sale por toda la superficie de la cara opuesta.

En el sistema cegesimal se llama a la unidad de resistividad, *ohmio-centímetro.*

Cuando se trata de metales buenos conductores, el ohmio-centímetro resulta una unidad excesivamente grande, y, por lo tanto, las resistividades vienen expresadas en números excesivamente pequeños. Para evitar este inconveniente, se toma como unidad de resistividad el *micro-ohmio-centímetro*, que es una millonésima de la unidad cegesimal.

En cambio, cuando se trata de aisladores, el ohmio-centímetro es excesivamente pequeño y se toma el *megohmio* o millón de ohmios.

La resistividad se representa siempre por la letra griega ρ, y sus valores son los incluídos en el cuadro de la página 10.

Resistencia total de un conductor. — Si la resistencia es la dificultad que un conductor opone al paso de la corriente, es evidente que será *directamente proporcional a la longitud del conductor e inversamente proporcional a la sección.* Llamando

l a la longitud y s a la sección, la resistencia total de un conductor podrá expresarse por la fórmula

$$R = \rho \frac{l}{s}.$$

Para los conductores de dimensiones usuales, se mide generalmente la longitud l en metros y la sección s en milímetros cuadrados; pero como las fórmulas están siempre preparadas para unidades cegesimales, será preciso modificar la anterior de este modo:

$$R = \rho \frac{l \times 100}{s \times 0{,}01} = 10{,}000\, \rho \frac{l}{s} = \rho' \frac{l}{s}. \quad [1]$$

En el cuadro de la página 10 se consignan también los valores de ρ', pero no olvidemos que con ellos, es preciso expresar l en metros y s en milímetros cuadrados.

La resistividad ρ' viene a ser la resistencia que opone al paso de la corriente, un hilo de un metro de longitud y un milímetro cuadrado de sección.

Cuerpos simples. — En el cuadro siguiente reunimos las constantes eléctricas y térmicas, que necesitamos en este tomo, correspondientes a los cuerpos simples, metales y metaloides, más empleados como conductores o como resistencias para la corriente eléctrica.

CONSTANTES ELÉCTRICAS Y TÉRMICAS DE LOS CUERPOS SIMPLES

Cuerpos	ρ	ρ′	δ	*a*	θ	*c*
Antimonio	0,0000354	0,354	6'72	0,0039	625	50
Bismuto .	0'0001309	1,309	9'70	0,0036	268	30
Cadmio ..	0,0000100	0,100	8'54	0,0042	321	55
Cobre	0,0000016	0,016	8'85	0,0039	1094	93
Estaño ...	0,0000132	0,132	7'30	0,0036	232	54
Hierro	0,0000133	0,133	7'58	0,0062	1600	116
Magnesio .	0,0000044	0,044	7'40	0,0038	633	246
Mercurio ..	0,0000941	0,941	13'59	0,0007	—39	33
Níquel ...	0,0000119	0,119	8'30	0,0062	1450	109
Oro......	0,0000021	0,021	19'26	0,0036	1063	31
Paladio. ..	0,0000102	0,102	11'40	0,0035	1543	55
Plata.....	0,0000015	0,015	10'40	0,0037	955	56
Platino ..	0,0000243	0,243	21'50		1753	32
Plomo	0,0000191	0,191	11'34	0,0039	326	30
Talio	0,0000176	0,176	»	0,0040	301	32
Cinc	0,0000056	0,056	7'16	0,0036	419	93
Aluminio .	0,0000029	0,029	2'77	0,0039	654	222

ρ resistividad en ohmios-centímetro.

ρ′ resistencia por metro lineal y milímetro cuadrado.

δ densidad.

a coeficiente de temperatura.

θ punto de fusión.

c calor específico en calorías gramo-grado.

Aleaciones. — En el cuadro de las págs. 11 y 12 reunimos las constantes correspondientes a las aleaciones más comúnmente empleadas en las instalaciones eléctricas, siendo, como antes, ρ' la resistencia en ohmios de un hilo que tenga un metro de longitud y un milímetro cuadrado de sección, y a el coeficiente de temperatura.

Respecto a la composición de las aleaciones, son las más importantes las siguientes:

La aleación llamada *plata-platino*, está compuesta de 66 partes de plata y 34 de platino.

El platino iridiado tiene 80 de platino y 20 de iridio.

El platino-rodio tiene 90 de platino y 10 de rodio.

La aleación oro-plata se compone de 90 partes de oro y 10 de plata.

La plata-aluminio contiene 96 de aluminio y 4 de plata.

El cobre-aluminio se compone de 97 de aluminio y 3 de cobre.

CONSTANTES ELÉCTRICAS Y TÉRMICAS DE LAS ALEACIONES

Aleaciones	ρ'	a
Plata-platino	0'31	0'00024
Platino iridiado	0'31	0'00082
Platino-sodio	0'21	0'00143
Oro-plata	0'06	0'00124
Plata-aluminio	0'04	0'00238
Cobre-aluminio	0'02	0'00381
Acero al manganeso	0'67	0'00089
— al níquel	0'29	0'00201
Mélchior	0'30	0'00027
Platinoide	0'41	0'00031

Aleaciones	ρ'	a
Silverina	0'02	0'00285
Cobre-níquel-aluminio	0'15	0'00064
Cobre-manganeso	1'00	0'00004
Cobre-níquel-manganeso	0'48	0'00003
Niquelina	0'45	»
Reotán	0'52	0'00041
Manganina	0'47	0'00000
Constatan	0'47	»
Reostatina al hierro	0'86	0'0007
— al cobre	0'48	0'00001
Carbón de filamentos	60'00	»

El mélchior, que es seguramente la aleación más empleada en las resistencias industriales, tiene la composición siguiente:

Cobre	60'10
Cinc	25'37
Níquel	14'03
Hierro	0'36
Manganeso	0'14

La silverina se compone de

Cobre	77
Níquel	17
Hierro	2
Cinc	2
Cobalto	2

La aleación llamada cobre-níquel-aluminio contiene estos tres cuerpos en las proporciones relativas de 87, 6'5 y 6'5 respectivamente.

El cobre-manganeso que contiene 70 partes del primer cuerpo y 30 del segundo.

El cobre-níquel-manganeso se forma de estos tres elementos en la proporción de 73, 3 y 24 respectivamente.

La niquelina tiene la siguiente composición:

Cobre	61'63
Cinc	19'30
Níquel	18'46
Hierro............	0'24
Manganeso	0'18
Cobalto	0'19

El reotán, nombrado así por su indicado empleo para reóstatos, se compone de los elementos siguientes:

Cobre	53'28
Cinc	16'59
Níquel	25'30
Hierro............	4'46
Manganeso	0'37

La manganina tiene la siguiente composición:

Cobre	84
Níquel	4
Manganeso	12

Resistencias Schniewindt. — En la revista *Physikalische Zeitschrift* se publicó la noticia de una nueva resistencia, debida a Schniewindt, que reunía como cualidades salientes, la de ser barata y la de estar especialmente indicada para las corrientes alternas, por su poco o ningún efecto de autoinducción y capacidad.

La resistencia está constituída por una cinta tejida con hilos de amianto como urdimbre y con hilo de mélchior como trama. Sus dimensiones son de 10 centímetros de ancho por 55 de largo, teniendo los cinco primeros centímetros y los cinco últimos, sin hilo de mélchior, con objeto de que pueda clavarse a los soportes.

Estas cintas se sujetan por sus extremos a placas de madera o mármol, disponiendo entre la placa y la cinta un bastidor o caballete que la mantenga separada de la placa. Los bordes de la cinta quedan formando una *V* invertida, apoyada por sus dos extremos en la placa. Esta colocación favorece grandemente el enfriamiento.

Los extremos del hilo de mélchior que sirve de trama a la cinta, se llevan a bornes de empalme para facilitar las conexiones. Generalmente, lleva dos bornes cada extremo, con objeto de empalmar varios elementos en serie o en paralela, según la tensión y la corriente de la potencia que deba consumirse.

Cada uno de los elementos resistentes, como el descrito, cuesta próximamente dos pesetas y es suficiente para cinco amperios a 150 voltios.

Resistencias de cromo. — Mr. A. L. Marsh, en 1908, obtuvo una patente en los Estados Unidos para fabricar una nueva substancia resistente, compuesta de 88 partes de níquel, 8 de cromo y 4 de aluminio. La adición del aluminio duplica la resistencia y produce una oxidación superficial de la aleación, que protege el resto de la masa.

Este cuerpo tiene una resistencia 50 veces mayor que la del cobre.

Resistencias de silicio. — En enero de 1910 el profesor Elihu Thomson patentó una resistencia de silicio de propiedades muy interesantes. Desde la temperatura normal hasta la fusión presenta el silicio una resistencia casi constante. Al llegar al rojo, se nota una pequeña variación de su conductancia, pero incomparable con las variaciones de las resistencias metálicas.

El coeficiente de temperatura del silicio es positivo hasta los 1000 grados, en que se hace negativo y mayor en valor absoluto, de manera que a estas elevadas temperaturas la resistencia decrece a medida que se calienta el silicio.

Esta propiedad hace que el silicio esté indicado para la construcción de reóstatos de arranque automático para motores, y para todos aquellos órganos en que se desea una disminución de resistencia cuando se calienten.

Resistencias de silundo. — La casa *Prometeus,* constructora de aparatos eléctricos de calefacción, emplea para la construcción de resistencias una substancia llamada *silundo,* que es carbón silicioso.

Se obtiene el silundo llevando el carbón incandescente a un vaso cerrado lleno de vapores de silicio, mantenidos a 1800-1900 grados de temperatura.

El silundo se emplea como resistencia, como carbones para arcos voltáicos y como muflas para los hornos eléctricos de laboratorio, substituyendo al platino que hasta ahora se empleaba.

Resiste grandes cargas eléctricas y no le atacan ni los vapores calientes de cloro, ni los ácidos. Unicamente le atacan los metales fundidos, como el hierro.

Resistencia del cuerpo humano. — Según un estudio publicado en *Scientific American*, la resistencia del cuerpo humano, entre los pies y las manos, cuando están perfectamente mojadas estas extremidades, es de 5000 ohmios, y puede representarse por la resistencia de un alambre de cobre que con un diámetro de 0'1 milímetros tenga 2350 metros de longitud.

En las condiciones habituales de relativa sequedad de pies y manos, la resistencia se eleva hasta quedar comprendida entre los 10000 y 20000 ohmios.

Adoptemos este último número y podremos calcular la corriente que atraviesa el cuerpo humano sometido a una tensión conocida.

Para 100 voltios, la fórmula de Ohm nos da

$$I = \frac{100}{20000} = \frac{1}{200} \text{ amperio.}$$

Si los 100 voltios son de tensión continua, no se sufrirá más daño que una conmoción desagradable. Si son de tensión alterna con la frecuencia usual de 50 períodos por segundo, produce una impresión de parálisis que hace difícil sostener el contacto con el circuito.

Con una tensión de 500 voltios, la corriente será

$$I = \frac{500}{20000} = 0{,}025 \text{ amperios.}$$

Los 500 voltios son siempre peligrosos, lo mismo en tensión continua que en tensión alterna, y, sobre todo, si la corriente al pasar por el cuerpo humano lo hace atravesando algún órgano de importancia.

Problemas relativos a resistencias. — La fórmula [1] es una relación entre las cuatro cantidades R, l, s, ρ', que permitirá calcular cualquiera de ellas cuando se conozcan las otras tres.

Las fórmulas preparadas serán:

$$R = \rho' \frac{l}{s} \qquad l = \frac{R\,s}{\rho'}$$

$$s = \rho' \frac{l}{R} \qquad \rho' = \frac{R\,s}{l}$$

que resolverán los problemas correspondientes.

En el cálculo de conductores, unas veces se habla de secciones y otras veces de diámetros; pero es fácil relacionar estas magnitudes. Siendo s la sección y d el diámetro, se tiene

$$s = \frac{\pi d^2}{4} = 0'7853\, d^2$$

$$d = \sqrt{\frac{4\, s}{\pi}} = 1'128 \sqrt{s}$$

EJEMPLO 1.º — *Calcular la resistencia de un hilo de cobre de 20 metros de longitud y 2 milímetros de diámetro.*

A un diámetro de 2 milímetros, corresponde una sección de

$$s = 0'7853 \times 2^2 = 3{,}14\,.$$

Para el cobre se tiene $\rho' = 0'016$ y aplicando la fórmula conocida de la resistencia total

$$R = 0'016 \frac{20}{3'14} = 0'102 \text{ ohmios.}$$

EJEMPLO 2.º — *En un tubo de vidrio, cuyo diámetro interior es de un milímetro, se vierte mercurio y se desea calcular la longitud de la columna líquida para conseguir dos ohmios de resistencia.*

La sección correspondiente a un milímetro de diámetro, es

$$s = 0'7853 \times 1^2 = 0{,}785 \text{ mm.}^2$$

Para el mercurio se tiene $\rho' = 0'941$ y aplicando la fórmula de la longitud

$$l = \frac{2 \times 0'785}{0{,}941} = 1'666 \text{ metros.}$$

EJEMPLO 3.º — *Calcular la sección que debe tener un hilo de hierro para que con 52 metros de longitud, tenga 3 ohmios de resistencia.*

Para el hierro se tiene $\rho' = 0{,}133$ y tomando la fórmula de la sección

$$s = 0'133 \frac{52}{3} = 2'3 \text{ mm.}^2$$

PROBLEMA 4.º — *Un alambre de plata-platino presenta 0'6 ohmios de resistencia, siendo sus dimensiones 5 metros de longitud y 2 milímetros cuadrados de sección. Calcular el coeficiente de resistividad de la liga plata-platino.*

La fórmula de la resistividad nos dará

$$\rho' = \frac{0'6 \times 2}{5} = 0'24$$

y si se quiere en ohmios centímetros

$$\rho = \frac{0'24}{10000} = 0'000024\,.$$

Relación entre la resistencia y el peso. — Los conductores eléctricos generalmente empleados en la práctica, son de forma cilíndrica y, por lo tanto, su volumen viene expresado como producto de su sección por su longitud

$$\text{volumen} = s.\ l$$

Expresando s en milímetros cuadrados y l en metros, el producto $s.\ l$ estará expresado en centímetros cúbicos.

Recordemos que la *densidad* δ *de una substancia, es el peso en gramos de su centímetro cúbico,* de manera que el peso de un conductor podrá expresarse por la fórmula

$$\text{peso} = s.\ l.\ \delta$$

En el cuadro de la página 10 se dan los valores de δ para los metales más usuales.

Para relacionar la resistencia y el peso, tomemos la fórmula

$$R = \rho' \frac{l}{s}$$

y multiplicando el numerador y denominador del último quebrado por $s\ \delta$, obtendremos

$$R = \rho' \frac{l.\ s.\ \delta}{s^2\ \delta} = \rho' \frac{p}{s^2\ \delta}$$

Como esta fórmula contiene cinco cantidades R, ρ', p, s, δ, permitirá calcular cualquiera de ellas cuando se conozcan las otras cuatro.

Las fórmulas correspondientes son

$$R = \rho' \frac{p}{s^2 \delta} \qquad \rho' = \frac{R\ s^2\ \delta}{p} \qquad p = \frac{Rs\ ^2\ \delta}{\rho'}$$

$$s = \sqrt{\frac{\rho' p}{R\ \delta}} \qquad \delta = \frac{\rho' p}{R\ s^2}$$

No olvidemos que siendo s milímetros cuadrados, p deben ser gramos.

EJEMPLO. — *¿Cuánto pesará una línea telegráfica, montada con alambre de hierro de 20 mm² de sección, siendo su resistencia de 3000 ohmios?*

Para el hierro se tiene $\delta = 7'58$.
Tomando la fórmula del peso

$$p = \frac{3000 \times 20^2 \times 7'58}{0'133} = 68541000 \text{ gramos,}$$

o sea 68'54 toneladas.

Variación de la resistencia con la temperatura. — El calor, al dilatar los metales, parece que hace menos íntimo el contacto de sus moléculas, aumentando por lo tanto su resistencia eléctrica.

Llamaremos *coeficiente de temperatura* de un metal cualquiera, al aumento que experimenta su resistencia por ohmio y por grado centígrado.

Representando por R_o y R_t las resistencias de un conductor a las temperaturas de 0 grados y t grados, y siendo a el coeficiente de temperatura se relacionan estas cantidades mediante la fórmula

$$R_t = R_o (1 + a\ t)$$

Los valores de a se expresan en la 5.ª columna del cuadro de la página 10.

De la fórmula anterior se deducen también las fórmulas

$$R_o = \frac{R_t}{1 + a\,t}$$

$$a = \frac{R_t - R_o}{R_o\,t} \qquad t = \frac{R_t - R_o}{R_o\,a}$$

que permiten resolver otros problemas relacionados con esta cuestión.

EJEMPLO 1.º — *Un conductor de cobre presenta* 0,25 *ohmios de resistencia cuando se opera á* 15 *grados de temperatura. ¿Qué resistencia presentaría si se operase á cero grados?*

Para el cobre se tiene $a = 0{,}0039$, y tomando la fórmula de R_o tendremos

$$R_o = \frac{0{,}25}{1 + 15 \times 0{,}0039} = \frac{0{,}25}{1{,}0585} = 0'23 \text{ ohmios.}$$

EJEMPLO 2.º — *La resistividad de un metal es á* 0 *grados* 0,0000093, *y á* 100 *grados* 0,0000155. *¿Cuál es el coeficiente de temperatura?*

Tendremos

$$a = \frac{0{,}0000155 - 0{,}0000093}{0{,}0000155 \times 100} = 0{,}004$$

EJEMPLO 3.º — *En el cálculo de dínamos y transformadores, se toma la resistividad del cobre, igual á* 0,02 *en lugar de* 0,016 (valores de ρ'). *¿Qué temperatura se supone?*

La fórmula de t nos dará

$$t = \frac{0{,}02 - 0{,}016}{0{,}016 \times 0{,}0039} = 63 \text{ grados.}$$

Variaciones de la resistencia con la luz. — Hay algunos cuerpos, muy pocos, cuya resistencia varía cuando varía la luz que llega a su superficie.

Entre estos cuerpos está el selenio, cuyas variaciones de resistencia son muy notables, y se han aprovechado para un sistema especial de telefonía sin hilos, debido a Símons Rhumer, más antiguo que los actuales procedimientos hertzianos.

En diciembre de 1911, presentó Mr. Vaillant a la Academia de Ciencias de París un estudio sobre las variaciones de resistencia del sulfuro de calcio, sometido a variaciones de luz.

En el selenio, la resistencia varía en cuanto cambia la luz y tan rápidamente como cambia ésta. Sólo así se concibe su aplicación a las transmisiones telefónicas.

En el sulfuro de calcio las variaciones de resistencia se presentan después de algún tiempo de sufridas las variaciones de luz.

Mr. Vaillant estudia en el fenómeno tres períodos distintos:

1.º Período de iluminación.

2.º Período durante el cual la resistencia disminuye aun cuando la iluminación cese.

3.º Período de restablecimiento de la resistencia.

En el primer período, la resistencia decrece primero lentamente, luego algo más rápidamente y por fin lentamente otra vez. Llega la resistencia a un mínimo y luego crece lentamente. Este mínimo tarda más cuando la iluminación del sulfuro es menos intensa. Con una lámpara de 5 bujías se llega a la resistencia mínima al cabo de 210 minutos, mientras con una lámpara de 16 bujías se consigue el mínimo a los 70 minutos.

En el segundo período, al suprimir la iluminación, la resistencia empieza siempre por disminuir, aun cuando estuviera ya creciendo por haber traspasado el mínimo y alcanza un nuevo mínimo.

En el tercer período, el sulfuro de calcio recobra su resistencia normal, aumentando primero bruscamente, y lentamente luego.

Mr. Vaillant afirma que manteniendo el sulfuro de calcio en la obscuridad completa durante cuatro o cinco días, se convierte en cuerpo casi perfectamente aislador.

Se sospecha que esta influencia de la luz en la resistencia eléctrica, tiene lugar en todos los cuerpos fosforescentes.

Resistencias de selenio. — El selenio, dispuesto sobre una placa de vidrio, posee gran poder de reflexión para la luz, de manera que de la luz que llega a su superficie, la mayor parte es reflejada, sin que influya en la disminución de su resistencia eléctrica.

Para reducir esta pérdida Mr. Gripenberg razona de este modo: Cuando se dirige un rayo de luz sobre una superficie de selenio, sólo una parte penetra en ella y actúa sobre su resistencia. Dirijamos la luz reflejada hacia una segunda superficie de selenio en la cual penetrará una parte y será reflejada la demás. Dirijamos la luz reflejada a una tercera superficie y así sucesivamente, hasta que después de algunas reflexiones toda la luz haya producido su efecto sobre el selenio.

Mr. Gripenberg dispone su elemento resistente del modo indicado en la figura 1.ª

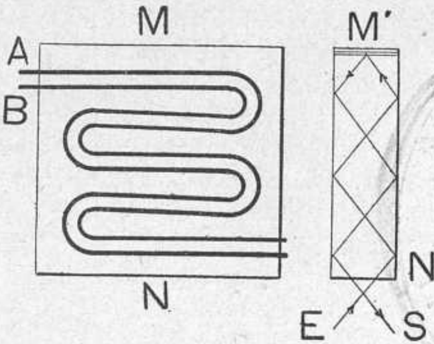

Fig. 1

Sobre una placa de vidrio *M N*, vista de canto según *M' N'*, hay dos hilos metálicos equidistantes, dispuestos en ziszás, que después de cubrir una de las caras de la placa pasan a la otra y la cubren en igual forma.

El conjunto de los dos hilos se recubre mediante una capa de selenio, en las dos caras del vidrio. De este modo la comunicación eléctrica entre los hilos *A* y *B* tiene lugar solamente a través del selenio interpuesto.

La placa de vidrio tiene uno de sus bordes *M'* plateado de manera que refleja toda la luz que llega a él.

Un rayo de luz que penetre en la masa de vidrio por E sufre una serie de reflexiones de pared a pared hasta llegar al fondo plateado M' y luego otra serie de reflexiones análogas hasta salir nuevamente por S de la placa de vidrio.

Queda así cumplida la condición de las múltiples reflexiones, de que hablábamos al principio, aprovechando el efecto de la luz en numerosos puntos de la superficie de selenio.

Pueden agruparse varios elementos resistentes como el descrito, para formar grandes resistencias o grandes conductancias. En el primer caso se reunirán los elementos en serie y en el segundo en paralela.

Mr. Gripenberg da los siguientes pormenores de sus elementos de selenio.

Un elemento de 15 cm.^{2} de superficie presentaba en la obscuridad 30 ohmios, de manera que alimentado a 110 voltios permitía una intensidad de 4 amperios próximamente. Iluminando el elemento con 2000 lux la resistencia bajaba a 6 ohmios y la intensidad subía a 19 amperios.

Respecto a la influencia del tiempo, se observa que a los diez segundos de volver a la obscuridad, la resistencia sube un 60 por 100.

Variación de la resistencia con el temple. — Monsieur Porteviu presentó a la Academia de Ciencias de París, en agosto de 1912, un estudio sobre la influencia del temple en la resistencia eléctrica del bronce y del latón.

Las muestras ensayadas, tenían la composición siguiente:

Cobre	50'10
Cinc	49'80
Hierro...........	0'10

y su resistencia eléctrica, cuidadosamente medida, daba los resultados siguientes en microhmios-centímetro.

Salido de fundición	4'6
Templado a 550º con agua a 18º	5'2
Recocido a 650º y enfriado lentamente durante 6 horas	5'0
Templado a 750º con agua a 16º	5'8

Influencia de las ondas hertzianas. — Una notabilísima influencia de las ondas hertzianas sobre determinadas resistencias, ha servido de fundamento para la construcción de los radioconductores o cohesores y detectores.

El nombre de radioconductor es debido a Branly y el de cohesor a Lodge.

Un radioconductor es un conductor constituído por una substancia discontinua, limaduras o polvos metálicos, cuya resistencia disminuye muy notablemente cuando está sometida a la acción de ondas hertzianas o electromagnéticas y que vuelve a su resistencia normal en cuanto se le imprime un ligero choque.

Los primeros cohesores empleados en telegrafía sin hilos, se constituían del siguiente modo.

En el interior de un tubo de vidrio *M N* (fig. 2.ª), se coloca un polvo metálico *a*, entre dos obturadores *m n*, de plata, unidos al circuito exterior por hilos de platino. Estas limaduras son de níquel, con un 4 por 100 de plata y una pequeña cantidad de mercurio, que aumenta su sensibilidad. Puede prescindirse de la adición del mercurio a las limaduras, amalgamando las bases interiores de los tapones.

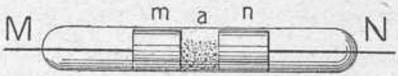

Fig. 2

Las dimensiones del tubo son: 38 mm. de largo por 2 a 2'5 de diámetro interior. Los obturadores de plata tienen una longitud de 5 mm., y la separación de sus caras interiores es de 0'55 mm.

La limadura es gruesa, hecha con una lima bastarda nueva, limpia y seca. Mediante un tamizado conveniente, se consigue que la limadura sea uniforme.

La limadura no ha de estar excesivamente apretada entre los electrodos; debe tener facilidad para moverse mediante el golpe del decohesor.

Un cohesor bien constituído debe acusar las ondas producidas por la chispa de ruptura de un timbre ordinario, situado a uno o dos metros de distancia. Además, debe interrumpir la corriente en un circuito no inductivo que contenga un solo elemento Leclanché.

La teoría del cohesor permanece aún bastante obscura a pesar de los esfuerzos hechos para explicar su funcionamiento. La que por ahora satisface más al espíritu, es la expresada por Lodge, del modo siguiente:

La presencia de ondas hertzianas puede compararse a la existencia de un campo eléctrico que, cargando estáticamente las limaduras, establece entre ellas diferencia de potencial. Merced a esta diferencia de potencial, saltan de limadura a limadura microscópicas chispas que las funden en parte, estableciendo entre ellas soldaduras tenues que las unen eléctricamente. Estos hilos de unión son tan tenues que un ligero choque o el movimiento de las limaduras por la presencia de un imán es suficiente para romperlos.

En telegrafía y telefonía sin hilos se llaman detectores a ciertos contactos metálicos, resistentes ordinariamente y que pierden gran parte de su resistencia cuando están sometidos a la acción de las ondas hertzianas.

En el tomo XXVIII de esta Biblioteca estudiaremos los detectores como órganos importantísimos de la radiotelegrafía. Aquí citaremos alguno de ellos solamente como ejemplo de resistencia variable por las ondas hertzianas.

En los detectores llamados de cristales, el contacto de resistencia variable se establece entre una punta metálica y un cristal.

El modelo construído por la casa Pericaud, de París, es el representado en la figura 3.ª

Una palanca flexible *A*, llevando el buscador *R*, gira sobre un eje vertical *B* y, por lo tanto, puede moverse en un plano horizontal. Un tornillo *C*, se apoya sobre la palanca, para que su extremo libre, que es el buscador, toque al cristal *D*.

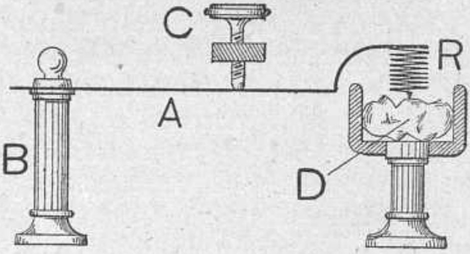

Fig. 3

El buscador está constituído por un hilo metálico, arrollado en hélice para que no rompa el contacto aun cuando sufra ligeros choques.

El cristal está contenido en una caja que puede girar alrededor de un eje vertical. Con este movimiento y el de la palanca *A* se comprende que el buscador pueda apoyarse en cualquier punto de la superficie del cristal.

Respecto a los cuerpos que forman el contacto detector, existen hoy multitud de variantes.

El detector Dunwoody tiene un cristal de carborundo sujeto entre dos electrodos de cobre.

Mr. Pickard construye un detector, llamado *silicón*, con una punta metálica y un cristal de silicio. Otro, llamado *pericón*, con una punta de calcopirita y un cristal de óxido de cinc.

El detector Meunier contiene una punta metálica y un cristal de pirita de hierro.

El funcionamiento de los detectores de cristales, como el de los cohesores, no se explica todavía de un modo completamente satisfactorio. Se admite que las oscilaciones eléctricas determinan un efecto Joule en el contacto de metal y cristal, elevan su temperatura y dan lugar a la creación de corrientes termoeléctricas.

El fenómeno debe ser más complicado, por cuanto muchos detectores de cristales presentan la *conductibilidad unilateral*, es decir, permiten la circulación de la corriente en un sentido y la impiden en sentido contrario.

Conductancia y conductividad. — Conductancia de un conductor y conductividad de una substancia son las inversas de la resistencia y de la resistividad.

Representando la conductancia por K, podremos escribir

$$K = \frac{1}{R}$$

y, del mismo modo, siendo γ la conductividad o conductancia específica,

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

Según hemos dicho en el tomo I, página 90, la unidad de conductancia es el *mhoio* y la de conductividad será el *mhoio-centímetro.*

La conductancia total de un conductor, como inversa de la resistencia, será

$$K = \gamma \frac{s}{l}$$

y, por lo tanto, *es directamente proporcional a la sección del conductor, e inversamente a la longitud.*

Esta fórmula, como todas las de la Electrotecnia, está preparada para las unidades cegesimales. Si se expresa la sección en milímetros cuadrados y la longitud en metros, tendremos que escribir

$$K = \gamma \frac{s \times 0'01}{l \times 100} = \frac{\gamma}{10000} \frac{s}{l} = \gamma' \frac{s}{l}$$

Comparando este resultado con el obtenido en la página 31, se ve que

$$\gamma' = \frac{1}{\rho'} \qquad \text{y} \qquad K = \frac{1}{\rho'} \frac{s}{l}$$

Por lo tanto, podremos calcular la conductancia de un conductor mediante los valores de ρ' que se consignan en el cuadro de la página 10.

EJEMPLO 1.º — *Conductancia de un hilo de plata que tiene un diámetro de* 1 *mm. y una longitud de* 5 *metros.*

Para un diámetro de 1 mm. corresponde una sección

$$s = \frac{\pi \times 1^2}{4} = 0{,}785 \text{ mm.}^2$$

Siendo para la plata $\rho' = 0{'}015$, tendremos

$$K = \frac{1}{0{,}015} \times \frac{0{'}785}{5} = 10{'}47 \text{ mhoios.}$$

EJEMPLO 2.º — *Entre dos puntos existe un hilo metálico de 3 mm.² de sección y 4 m. de longitud. Se desea obtener una conductancia doble empleando un hilo del mismo metal, pero de 1 mm.² de sección, ¿qué longitud debe tener el nuevo hilo?*

Con el hilo antiguo la conductancia es

$$K = \frac{1}{\rho'} \frac{3}{4}$$

y con el hilo nuevo, debe ser

$$2\,K = \frac{1}{\rho'} \frac{1}{l}.$$

Dividiendo miembro a miembro estas dos igualdades

$$\frac{K}{2K} = \frac{1}{\rho'} \frac{3}{4} \times \frac{\rho'}{1} \frac{l}{1}, \text{ o bien, } \frac{1}{2} = \frac{3\,l}{4}$$

de donde

$$l = \frac{4}{2 \times 3} = 0{'}666 \text{ metros.}$$

CAPÍTULO II

GENERALIDADES SOBRE REÓSTATOS

Agrupación de resistencias. — Varias resistencias componentes pueden agruparse para dar lugar a una resistencia compuesta mayor o menor que una cualquiera de las componentes y teniendo con ellas una relación sencilla.

Si las resistencias componentes se ponen unas a continuación de otras, de manera que el fin de una comunique con el principio de la siguiente, se dice que las resistencias están acopladas *en serie o tensión*.

Si las resistencias componentes se ponen unas al lado de las otras de manera que se reunan en un punto todos los principios de resistencias y se reunan en otro punto todos los fines, se dice que las resistencias están acopladas *en paralela o cantidad*.

De las definiciones de acoplamiento en serie y acoplamiento en cantidad, se deducen desde luego las propiedades siguientes:

En serie:

La diferencia de potencial exigida por la resultante, es la suma de las diferencias de potencial exigidas por las componentes.

La corriente que pasa por la resultante de varias resistencias iguales es la misma que pasa por una de las componentes.

Así, por ejemplo, si un arco voltaico exige 50 voltios y consume 15 amperios, montando 4 arcos en serie, exigirán $50 \times 4 = 200$ voltios y consumirán 15 amperios.

La potencia consumida será

$$200 \times 15 = 3000$$

vatios.

Las resistencias se montarán en serie cuando se desee consumir muchos voltios.

En paralela:

La corriente gastada por la resultante de varias resistencias iguales es la suma de las corrientes gastadas por las componentes.

La tensión exigida por la resultante es la misma que la exigida por una de las componentes.

Así, por ejemplo, si un arco voltaico exige 50 voltios y consume 15 amperios, montando 4 arcos en paralela exigirán 50 voltios y consumirán $15 \times 4 = 60$ amperios.

La potencia consumida será

$$50 \times 60 = 3000$$

vatios.

Las resistencias se montarán en paralela cuando se desee consumir muchos amperios.

Cálculo de resistencias en serie. — Hemos dicho que la resistencia de un conductor es proporcional a la longitud

$$R = \rho \frac{l}{s},$$

luego si sumamos las longitudes de varios conductores para formar una longitud total, también deberemos sumar las resistencias componentes para calcular la resistencia total. De manera que la resistencia R, compuesta de varias resistencias r_1 r_2 r_3... unidas en serie, vale

$$R = r_1 + r_2 + r_3 + \ldots$$

Recordando que la conductancia es inversa de la resistencia, podremos escribir la igualdad anterior en la forma

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_2} + \ldots$$

de donde podrá deducirse

$$K = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \ldots}$$

De las dos fórmulas halladas para R y K se deducen los dos principios siguientes:

La resistencia compuesta de varias resistencias en serie, es igual a la suma de las resistencias componentes.

La conductancia compuesta de varias conductancias en serie, es la inversa de la suma de las inversas de las conductancias componentes.

Como caso particular, si fuesen sólo dos las conductancias componentes, la fórmula de K se reduciría a

$$K = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}} = \frac{1}{\frac{k_2 + k_1}{k_1 \, k_2}} = \frac{k_1 \, k_2}{k_1 + k_2}$$

lo cual nos dice que *la conductancia compuesta de dos conductancias en serie es igual al próducto partido por la suma de las conductancias componentes.*

Si las resistencias acopladas en serie fuesen todas iguales entre sí, y su número fuese n, tendríamos para valor de la resistencia compuesta

$$R = n \, r$$

y para la conductancia

$$K = \frac{k}{n}$$

lo cual nos dice que *el acoplamiento en serie multiplica la resistencia y divide la conductancia.*

EJEMPLO 1.º — *Calcular la resistencia compuesta acoplando en serie cinco resistencias de* 1, 2, 5, 8 y 10 *ohmios.*

La fórmula de la resistencia será

$$R = 1 + 2 + 5 + 8 + 10 = 26 \text{ ohmios.}$$

También podíamos haber calculado la conductancia en lugar de la resistencia. Las cinco resistencias de 1, 2, 5, 8 y 10 ohmios, son conductancias de 1, 0'5, 0'2, 0'125 y 0'1 mhoios, luego la conductancia resultante será:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{0'5} + \frac{1}{0'2} + \frac{1}{0'125} + \frac{1}{0'1}}.$$

$$= \frac{1}{1 + 2 + 5 + 8 + 10} = \frac{1}{26} = 0'038 \text{ mhoios.}$$

EJEMPLO 2.º — *En una línea telegráfica de 5 kilómetros existen 3 kilómetros de hilo de cobre de 3 mm. de diámetro y 2 kilómetros de hilo de hierro de 4 mm. Se desea substituir la línea por un solo conductor de aluminio de sección uniforme en toda su longitud. ¿Cuál debe ser su diámetro para que tenga la misma resistencia que la línea antigua?*

Los conductores de cobre y de hierro están reunidos en serie.

Las resistividades del cobre, hierro y aluminio son respectivamente

$$0'016 \qquad 0'133 \qquad 0'029$$

luego la condición que deben cumplir los antiguos conductores y el nuevo, es

$$0{,}016 \frac{3000}{\frac{\pi \times 3^2}{4}} + 0'133 \frac{2000}{\frac{\pi \times 4^2}{4}} = 0'029 \frac{5000}{\frac{\pi d^2}{4}}$$

dividiendo por 1000 y suprimiendo el factor π y el divisor 4 en todos los términos, resulta

$$\frac{0'016 \times 3}{3^2} + \frac{0'133 \times 2}{4^2} = \frac{0'029 \times 5}{d^2}$$

y efectuando operaciones

$$\frac{527}{24} = \frac{145}{d^2}$$

de donde

$$d^2 = \frac{24 \times 145}{527} = 6'60$$

y extrayendo la raíz cuadrada

$$d = \sqrt{6'60} = 2'57 \text{ milímetros.}$$

Cálculo de resistencias en paralela. — Hemos dicho que la conductancia de un conductor es proporcional a la sección

$$K = \gamma \frac{s}{l}$$

luego si sumamos las secciones de varios conductores para formar una sección total, también deberemos sumar las conductancias componentes para calcular la conductancia total. De manera que la conductancia compuesta K, de varias conductancias $k_1\ k_2\ k_3$ ... reunidas en paralela, vale

$$K = k_1 + k_2 + k_3 + \ldots$$

Recordando que la resistencia es inversa de la conductancia, podremos escribir la igualdad anterior en la forma

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \dots$$

de donde puede deducirse

$$R = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \dots}$$

De las dos fórmulas halladas para K y R se deducen los dos principios siguientes:

La conductancia compuesta de varias conductancias en paralela, es igual a la suma de las conductancias componentes.

La resistencia compuesta de varias resistencias en paralela, es la inversa de la suma de las inversas de las resistencias componentes.

Como caso particular, si fuesen sólo dos, las resistencias componentes, la fórmula de R se reduciría a

$$R = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}} = \frac{1}{\frac{r_2 + r_1}{r_1 r_2}} = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$$

lo cual nos dice que *la resistencia compuesta de dos resistencias en paralela, es igual al producto partido por la suma de las resistencias componentes.*

Si las conductancias acopladas en paralela fuesen todas iguales entre sí, y su número fuese n, tendríamos para valor de la conductancia compuesta

$$K = n\,k$$

y para la resistencia

$$R = \frac{r}{n}$$

lo cual nos dice que *el acoplamiento en paralela multiplica la conductancia y divide la resistencia.*

EJEMPLO 1.º — *Calcular la resistencia compuesta acoplando en paralela cinco resistencias de* 1, 2, 5, 8 *y* 10 *ohmios.*

Según la fórmula hallada para R tendremos

$$R = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{5} + \frac{1}{8} + \frac{1}{10}}$$

Multiplicando por 40 que es el mínimo común múltiplo de 1, 2, 5, 8 y 10, el numerador y el denominador de esta fracción

$$R = \frac{40}{40 + 20 + 8 + 5 + 4} = \frac{40}{77} = 0'519 \text{ ohmios}$$

EJEMPLO 2.º — *Un conductor eléctrico tiene una resistencia* R. *Si este conductor se parte en* n *trozos iguales y todos los trozos se reunen en paralela, ¿cuál será la resistencia del conjunto?*

Uno de los trozos tiene su longitud n veces menor que el conductor completo, luego su resistencia será:

$$\frac{R}{n}$$

Pero reuniendo en paralela n trozos iguales, la resistencia compuesta será n veces menor que la de un trozo, luego será

$$\frac{R}{n} : n = \frac{R}{n^2}$$

que es la resistencia que se pedía.

EJEMPLO 3.º — *Un aparato de medición tiene una resistencia* A. *Se desea montar una resistencia* S, *en paralela con el aparato, para que el conjunto tenga una resistencia* n *veces menor que el aparato solo.*

Las resistencias A y S deben cumplir la condición

$$\frac{A\,S}{A+S} = \frac{A}{n}, \text{ o bien, } \frac{S}{A+S} = \frac{1}{n}$$

Haciendo el producto de extremos igual al de medios

$$Sn = A + S$$

de donde

$$S = \frac{A}{n-1}.$$

Si el aparato tuviese 60 ohmios y debiera reducirse la resistencia a la cuarta parte tendríamos:

$$S = \frac{60}{4 - 1} = 20$$

y, en efecto, la resistencia del conjunto sería

$$\frac{60 \times 20}{60 + 20} = \frac{1200}{80} = 15$$

que es la cuarta parte de 60.

Cálculo de resistencias en agrupación mixta. — Varios conductores se dice que están montados en

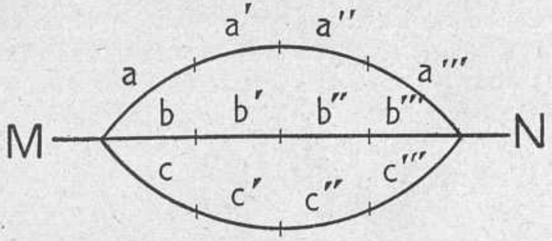

Fig. 4

acoplamiento mixto cuando se forman con ellos varias series *a a' a''*... *b b' b''*... (fig. 4.ª) para reunir luego todas las series en cantidad entre dos puntos *M N*; o también, cuando se forman varios grupos *a a' a''* ... *b b' b''* ... (fig. 5.ª) para reunir luego en serie todos los grupos.

Para hallar la resistencia total en cualquiera de los dos casos dibujados bastará hallar las resistencias compuestas de $a\ a'\ a''$ ... $b\ b'\ b''$ ... y tratar luego estos resultados como si fuesen conductores simples, para calcular el grupo en paralela de la figura 4.ª o la serie de la figura 5.ª

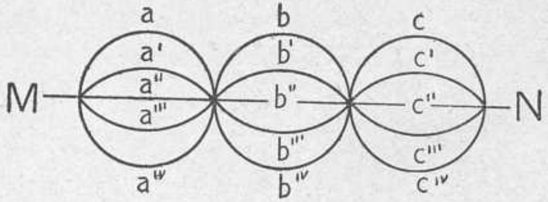

Fig. 5

Consideremos el caso particular de que todas las resistencias componentes fuesen iguales, siendo t el número de resistencias en tensión y p el número de las montadas en paralela.

Con el montaje de la figura 4.ª cada serie tendría una resistencia

$$t\,r$$

y el conjunto de las p series

$$R = t\,\frac{r}{p}$$

Con el montaje de la figura 5.ª cada grupo de resistencias en paralela tendría una resistencia compuesta

$$\frac{r}{p}$$

y los t grupos, reunidos en tensión

$$R = t\,\frac{r}{p}$$

igual que en el primer montaje.

Si el número de elementos en tensión fuese igual al número de elementos en paralela ($t = p$) la fórmula anterior nos daría

$$R = r$$

de manera que la resistencia compuesta sería igual a una de las resistencias componentes.

Reóstato de lámparas. — Para las mediciones eléctricas que se efectúan en los talleres de construcción o en las salas de pruebas, se emplean frecuentemente reóstatos formados de lámparas de incandescencia con filamento de carbón, convenientemente agrupadas en un montaje mixto.

Tiene este reóstato alguna ventaja sobre los metálicos y electrolíticos que estudiaremos luego; en ellos, el efecto de autoinducción es muy pequeño o nulo, lo cual es muy interesante cuando se trata de corrientes alternas; además, en el reóstato de lámparas no se producen efectos electrolíticos que alteren su resistencia, lo cual es importante cuando se trata de corriente continua.

Las fórmulas halladas para el acoplamiento mixto nos permiten calcular el reóstato de lámparas.

Propongámonos formar una resistencia R con lámparas iguales que tienen cada una la resistencia r.

Reuniendo t lámparas en tensión y agrupando luego p series en paralela, obtendremos un rectángulo de $p\,t$ lámparas que presentarán una resistencia compuesta

$$R = \frac{t\,r}{p},$$

fórmula que puede escribirse así:

$$\frac{t}{p} = \frac{R}{r} = \frac{k\,R}{k\,r}.$$

Los valores t y p deben ser forzosamente números enteros. Tomaremos

$$t = k\,R \qquad\qquad p = k\,r$$

y buscaremos por tanteos un número k que haga enteros los productos $k\,R$ y $k\,r$.

EJEMPLO. — *La carga máxima de una dínamo son* 300 *voltios y* 20 *amperios. Para probar su calentamiento en plena carga, se desea calcular un reóstato formado con lámparas de* 100 *ohmios, que absorba toda la potencia de la máquina.*

Para 300 voltios y 20 amperios, la resistencia, según la ley de Ohm, será

$$R = \frac{V}{I} = \frac{300}{20} = 15 \text{ ohmios.}$$

Los números de lámparas en tensión y en paralela serán:

$$t = k \times 15 \qquad p = k \times 100$$

Conseguiremos que sean enteros ambos números, haciendo $k = \frac{1}{5}$ con lo cual serán

$$t = 3 \qquad p = 20\,.$$

Reóstato variable de lámparas. — Para constituir un reóstato de taller, mediante lámparas, cuya resistencia total pueda variarse a voluntad, es cómoda la disposición que se indica en la figura 6.ª

Cada lámpara L tiene sus extremos comunicando con un conmutador de entrada E y con otro conmutador de salida S. Estos conmutadores a excepción del primero y del último, son de dos direcciones. Los de entrada pueden poner la lámpara en comunicación con el hilo grueso A o con la lámpara anterior, y los de salida pueden poner la lámpara en comunicación con la siguiente o con el hilo fino B.

De este modo, entre los hilos A y B pueden derivarse diversas series de lámparas, formándose cada serie de cualquier número de ellas.

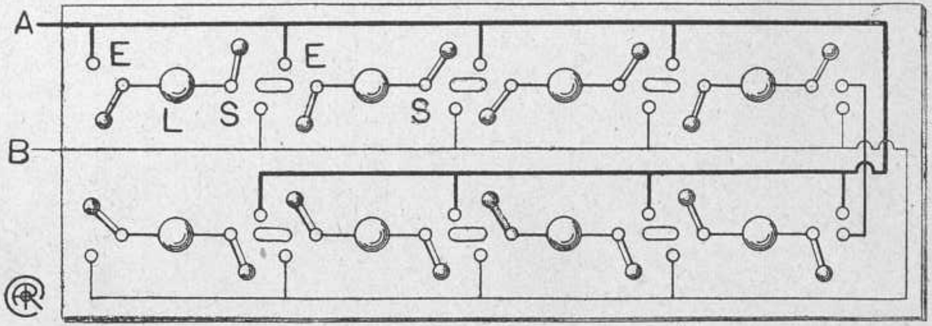

Fig. 6

Si el reóstato se compone de n lámparas de r ohmios cada una, la mayor resistencia que podrá conseguirse, será $n\,r$ poniendo en serie todas las lámparas, y la menor resistencia será $\frac{r}{n}$, cuando todas las lámparas se monten en derivación.

Reóstatos metálicos. — Las resistencias metálicas se construyen generalmente de aleaciones resistentes que la industria ofrece con los nombres de mélchior, niquelina, kruppina, etc., y algunas veces se construyen con hilos de hierro, galvanizados o ligeramente cobreados en su superficie, para evitar la oxidación.

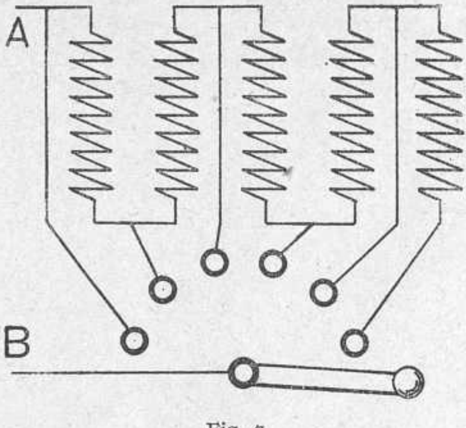

Fig. 7

Si las resistencias metálicas han de ser invariables se reducen a una o varias hélices de hierro estiradas y sujetas por sus extremos a puntos fijos.

Si las resistencias han de variarse con frecuencia se forman los reóstatos mediante hélices estiradas y fijas como en el caso anterior, pero sacando derivaciones de los puntos de unión de una hélice con otra y llevando estas derivaciones a distintos bloques de un conmutador circular, como se indica en la figura 7.ª

La corriente llega por *A* y sale por *B* atravesando ninguna, una o varias hélices del reóstato, según la posición de la palanca.

Devanado de los hilos resistentes. — Generalmente, los hilos resistentes se disponen en los reóstatos, formando hélices estiradas, con objeto de que las vueltas consecutivas no se toquen, es decir, para que sirva de aislador entre las vueltas, el aire que las separa. Esta disposición no tiene inconveniente alguno cuando el reóstato ha de utilizarse con corriente continua; pero si la corriente es alterna, la existencia de tantas vueltas produce notable efecto de autoinducción, tanto mayor cuanto mayor sea la frecuencia de la corriente empleada, según hace ver la fórmula conocida de la inductancia

$$tang\,\varphi = -\frac{a\,\mathcal{L}}{R} = -\frac{2\,\pi\,f\,\mathcal{L}}{R}$$

(Tomo II, página 52).

Para evitar este inconveniente se emplean los enrollamientos Chaperon, que consisten en disponer los hilos resistentes formando seis hélices, según se representa esquemáticamente en la figura 8.ª, que son recorridas en sentidos contrarios por la corriente, como se ve por las flechas.

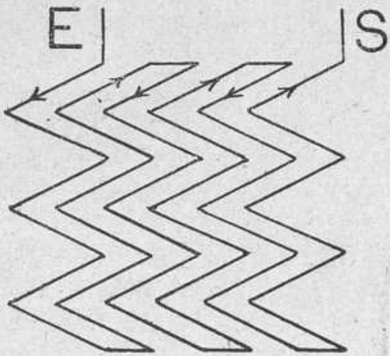

Fig. 8

De este modo, los flujos creados por las hélices son de direcciones contrarias e igualmente son contrarios y se anulan los efectos de autoinducción

$$\mathcal{L} = \frac{\mathcal{N}}{i}$$

(Tomo I, página 159).

El devanado Chaperón se reduce también a dos hélices solamente, llamándose entonces enrollamiento bifilar.

En ambas disposiciones, si bien queda corregida completamente la inductancia, aparece en cambio la capacitancia, debido a la existencia de dos hilos metálicos, paralelos y equidistantes en gran longitud.

Con objeto de corregir a la vez la inductancia y la capacitancia, ideó la casa Rhustral de Gœttingen un enrollamiento llamado *en cruz*, del cual dió cuenta la revista *Elektrotechnische Anzeiger* en 1912.

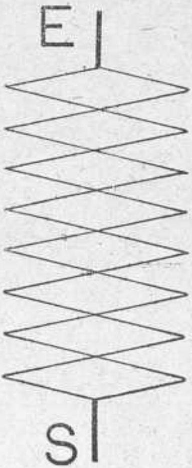

Fig. 9

El enrollamiento en cruz consiste en emplear para cada elemento resistente, dos hilos iguales montados en paralela, formando dos hélices iguales arrolladas en sentido contrario, y tocándose los conductores en todos los puntos en que se cruzan. La figura 9.ª da idea esquemáticamente de este arrollamiento y es fácil ver en ella que se tienen los dos arrollamientos opuestos para evitar por completo la autoinducción y que estos arrollamientos se tocan en varios puntos para evitar los efectos de capacidad.

Es condición precisa que los dos arrollamientos sean absolutamente de igual resistencia.

Clasificación de los reóstatos. — Los reóstatos metálicos se clasifican, por su funcionamiento, en dos grupos que son: *reóstatos reguladores y reóstatos de arranque*.

Los reguladores pueden estar en circuito un tiempo indefinido, como sucede a los que se intercalan en el circuito de los arcos voltaicos para reducir la tensión de alimentación y a los que se emplean para regular la velocidad de los electromotores.

Los reóstatos de arranque se ponen en circuito durante breve tiempo, como sucede a los empleados para la arrancada de los electromotores.

El cálculo de las secciones de los hilos resistentes, se efectúa de muy distinta manera, según se trate de reóstatos reguladores o de arranque. Desde luego se comprende que los hilos resistentes deben tener mayor sección en los reguladores, ya que en éstos, el efecto Joule produciría mayor elevación de temperatura, porque la corriente circula por ellos durante mucho tiempo.

Veamos los métodos de cálculo.

Reguladores. — Para construir una resistencia R por la cual debe circular una corriente I, calcularemos el diámetro d del hilo resistente, con la condición de que *la superficie lateral del hilo resistente, sea suficiente para radiar todo o parte del calor absorbido por efecto Joule.*

Para ello se asignan k centímetros cuadrados de superficie lateral por cada vatio transformado en calor.

Siendo d el diámetro del hilo y l su longitud, la superficie de enfriamiento será

$$\pi\, d\, l$$

y siendo R la resistencia e I la intensidad, el efecto Joule será (tomo I, pág. 104).

$$R I^2 = \rho \frac{l}{s} I^2 = \rho \frac{l}{\frac{\pi d^2}{4}} I^2 = \frac{4 \rho l I^2}{\pi d^2}$$

La superficie ha de ser k veces mayor que el número de vatios luego

$$\pi d l = k \frac{4 \rho l I^2}{\pi d^2}$$

de donde

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 k \rho}{\pi^2}} \sqrt[3]{I^2} \text{ centímetros.}$$

El primer radical es constante para un mismo metal, en cuanto se fija k, luego la fórmula anterior podrá tomar la forma

$$d = a \sqrt[3]{I^2}$$

Los valores de a son:

	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=4$	$k=5$	$k=6$
Mélchior	0'0229	0'0289	0'0331	0'0365	0'0393	0'0417
Hierro..	0'0159	0'0200	0'0229	0'0253	0'0270	0'0289

La longitud del hilo resistente se calculará mediante la fórmula

$$l = \frac{R \pi d^2}{4 \rho} \quad \text{o} \quad l = \frac{R s}{\rho}$$

EJEMPLO. — *Con hilo de mélchior, se desea construir una resistencia de 3 ohmios para 30 amperios.*

Fijando $k = 5$, es decir, 5 centímetros cuadrados por vatio transformado en calor, tendremos

$$d = 0'0393 \sqrt[3]{30^2} = 0'379 \text{ cm.}$$

A este diámetro corresponde una sección de 12 mm.², por lo tanto la longitud será

$$l = \frac{3 \times 12}{0'3} = 120 \text{ metros.}$$

Si en lugar de asignar cinco centímetros cuadrados de superficie radiante por cada vatio transformado en calor, limitásemos el valor de k a 1 solamente, el diámetro sería:

$$d = 0'0229 \sqrt[3]{30^2} = 0'221 \text{ cm}$$

A este diámetro corresponde una sección de 4 mm.² por lo tanto, la longitud será

$$l = \frac{3 \times 4}{0'3} = 40 \text{ metros.}$$

Los resultados obtenidos en los dos cálculos anteriores, hacen ver la gran influencia que ejerce en la longitud del hilo el valor escogido para k.

Reóstatos de arranque. — Para calcular la sección del hilo resistente en los reóstatos de arranque, fijaremos el exceso de temperatura sobre el ambiente $t_2 - t_1$ que puede alcanzar el hilo durante el tiempo θ que está en circuito.

Una resistencia R recorrida por un intensidad I *durante un tiempo* θ, consume un trabajo de

$$R I^2 \theta = \rho \frac{l}{s} I^2 \theta \text{ julios.}$$

Estos julios se transforman en calorías sin más que multiplicar por 0'24 (tomo II, pág. 170).

$$\rho \frac{l}{s} I^2 \theta \times 0'24 \text{ calorías.}$$

Si cada gramo del metal empleado necesita c calorías para elevar un grado su temperatura, es evidente que p gramos de metal necesitarán cp calorías para aumentar un grado, y para aumentar $(t_2 - t_1)$ grados.

$$cp\,(t_2 - t_1) \text{ calorías}$$

El peso p se el producto del volumen por la densidad, es decir, el producto de la sección s por la longitud l por la densidad δ, luego la expresión última será:

$$csl\delta\,(t_2 - t_1) \text{ calorías.}$$

Igualando este número de calorías al de las producidas por efecto Joule, tendremos

$$csl\delta(t_2 - t_1) = \rho \frac{l}{s} I^2 \theta \times 0'24$$

o $$cs^2\delta(t_2 - t_1) = \rho I^2 \theta \times 0'24$$

de donde se deduce:

$$s = \sqrt{\frac{\rho\theta \times 0'24 I^2}{c\delta(t_2 - t_1)}} = I\sqrt{\frac{\rho \times 0'24}{c\delta}}\sqrt{\frac{\theta}{t_2 - t_1}}$$

El primer radical es constante para un mismo metal, luego la fórmula anterior podrá ponerse en la forma:

$$s = a I \sqrt{\frac{\theta}{t_2 - t_1}} \text{ mm.}^2$$

Para aplicar esta fórmula daremos al coeficiente a los valores siguientes:

Hierro	0'168
Cobre	0'071
Niquelina	1'250
Kruppina	1'560
Mélchior	0'300

Conocida la sección y la resistencia de un hilo se calculará su longitud mediante la fórmula conocida

$$l = \frac{Rs}{\rho}$$

EJEMPLO. — *Calcular un hilo de mélchior de 5 ohmios, que recorrido por 20 amperios durante 25 segundos, alcance una temperatura de 400 grados sobre el ambiente.*

La sección será:

$$s = 0'300 \times 20 \sqrt{\frac{25}{400}} = 1'5 \text{ mm.}^2$$

La longitud será:

$$l = \frac{5 \times 1'5}{0'3} = 25 \text{ metros.}$$

Reóstato variable para laboratorio. — El *Electrical Engineering* publicó en 1908 una disposición para reóstato de taller con resistencia variable, que representamos esquemáticamente en la figura 10. Se compone de 38 resistencias que suman en total 82'25 ohmios, pudiendo variarse de centésima en centésima de ohmio.

Existe un reóstato principal, cuyo centro es *Q* y cinco reóstatos auxiliares o reóstatos de substracción, 1, 2, 3, 4 y 5.

El grupo *A* contiene tres resistencias de 16 ohmios, cada una; entre el grupo *A* y el *B* está intercalado el reóstato de substracción 5, que tiene 16 ohmios divididos en cuatro partes iguales de 4 ohmios cada una. Si la palanca de este reóstato ocupa la posición 0, entre el último bloque de *B* y el primero de *A* están intercalados los 16 ohmios del reóstato 5, sin suprimirse ninguna resistencia.

Si la palanca del reóstato 5 se coloca sobre el bloque 4, se suprimen 4 ohmios, y del mismo modo colocándola sobre los bloques 8 ó 12, se suprimen 8 ó 12 ohmios.

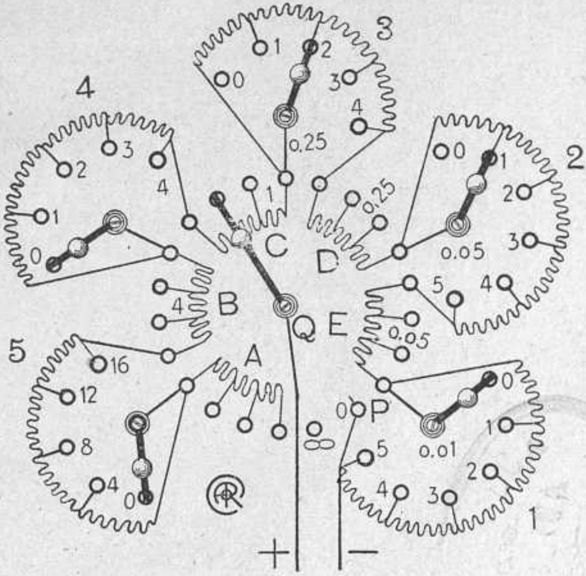

Fig. 10

El grupo *B* se compone de tres resistencias de cuatro ohmios cada una y a continuación, entre los grupos *B* y *C*, está intercalado el reóstato de substracción 4, con cuatro ohmios divididos en cuatro resistencias de un ohmio cada una.

Según que la palanca del reóstato 4 ocupa el posición 0, 1, 2, ó 3, así quedarán suprimidos del circuito 0, 1, 2 ó 3 ohmios.

El grupo *C* contiene resistencias de un ohmio y el reóstato 3 que le sigue, tiene un ohmio dividido en cuatro partes iguales.

El grupo *D* contiene resistencias de 0'25 y el reóstato 2 que le sigue, tiene 0'25 dividido en cinco partes de 0'05 cada una.

Finalmente, el grupo *E* contiene resistencias de 0'05 y el reóstato 1 contiene 0'05 dividido en cinco partes iguales de 0'01 cada una.

La resistencia total del reóstato entre los puntos *P* y *Q*, será la señalada por la palanca del reóstato principal, disminuída en la suma de las señaladas por los reóstatos de substracción, anteriores a la posición de la palanca del principal. En el caso de la figura, la resistencia sería

$$4'25 - (0'50 + 0'05) = 3'70 \text{ ohmios.}$$

Es fácil comprobar sobre la figura que puede darse al reóstato una resistencia cualquiera, entre cero y 85'25 variando de centésima en centésima.

Reóstato líquido. — El reóstato líquido está constituído por un recipiente *A*, que contiene un líquido cualquiera, resistente al paso de la corriente, y dos placas *B* y *C*, metálicas, bañadas por el líquido (fig. 11).

Entre los puntos *M* y *N* tendremos la resistencia correspondiente al prisma líquido ,comprendido entre las placas y que podrá calcularse por la misma fórmula de siempre.

$$R = \rho \frac{l}{s}$$

siendo ρ la resistividad del líquido, l la separación de las placas y s la superficie mojada.

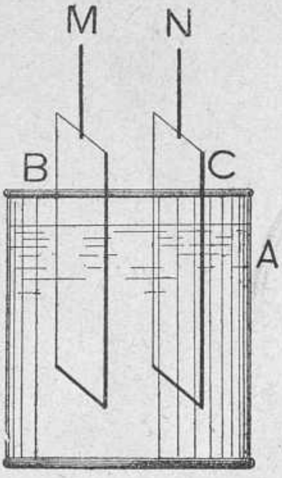

Fig. 11

Esta fórmula nos indica que para aumentar la resistencia del reóstato, bastará separar las placas o sacarlas más del baño.

La variación de resistencia en un reóstato líquido puede conseguirse tan lenta y continua como se desee, ya que los movimientos de las placas pueden ser igualmente lentos. Esto constituye una ventaja de estos reóstatos sobre los metálicos, en los cuales la variación de resistencia es brusca al moverse la palanca de un bloque a otro, aun cuando se multipliquen las hélices componentes.

Además, el funcionamiento de un reóstato metálico da lugar a interrupciones y cierres de circuito, con el consiguiente peligro de producción de chispas, lo cual no puede suceder en los reóstatos líquidos.

Finalmente, las condiciones económicas son también más ventajosas en los reóstatos líquidos que en los metálicos.

El reóstato líquido es el único procedimiento económico para consumir grandes potencias a tensiones elevadas.

Respecto a estos reóstatos Mr. H. Marchand da los siguientes consejos en un trabajo publicado en *L'Electricien*, el año 1910.

Sólo cuando se trate de grandes tensiones debe emplearse como baño el agua pura, que resulta muy resistente.

Tampoco es recomendable el empleo de disoluciones salinas.

Las placas de hierro están indicadas en los reóstatos de agua o de electrolitos alcalinos; las de plomo para los baños ácidos; las de cobre se emplean cuando el electrolito es una disolución de sulfato de cobre, y sólo para bajas tensiones. También se emplean los electrodos de carbón.

Un buen electrolito para bajas tensiones es el sulfato de aluminio. Tiene la ventaja de no dar vapores ni producir depósitos que deterioren los electrodos.

En los reóstatos líquidos, cualquiera que sea el electrolito empleado, siempre debe tenerse en cuenta la influencia del coeficiente de temperatura, que para algunos electrolitos llega a ser hasta —0,03. En los reóstatos de agua, debe contarse un coeficiente de temperatura de —0,007 a—0,01. En todos los casos, el coeficiente de temperatura cambia de un momento a otro, ya que el funcionamiento del reóstato altera la composición del electrolito.

El recipiente para montar un reóstato líquido, suele ser una vasija cualquiera, no construída especialmente para este objeto. Si puede escogerse, debe siempre preferirse un reóstato para cada una de las fases de la corriente, siendo el recipiente, largo, profundo y estrecho.

Si se emplea un sólo recipiente para reóstato de corrientes polifásicas con neutro, se colocará en el centro la placa metálica que comunica con el hilo neutro, y alrededor las que comunican con las fases, simétricamente y equidistantes del centro.

Cuando los reóstatos han de consumir grandes potencias, deben ponerse al recipiente vertederos que permitan salir el líquido a medida que se calienta. Sin esta precaución, y teniendo en cuenta la variación de resistencia con la temperatura

$$R_t = R_0\,(1 - at),$$

se comprende que al calentarse el líquido pudiera disminuirse la resistencia, hasta cargar peligrosamente la máquina.

Los recipientes para reóstatos líquidos se construyen de madera, barro cocido, vidrio, metal, etcétera, etc. Además de las condiciones económicas, es siempre más recomendable el recipiente no conductor. Los metálicos constituyen un verdadero shunt entre los electrodos y deben ser, por lo tanto, mayores que los no conductores.

En el recipiente de madera es de temer un calentamiento excesivo que los carbonice o los queme; pero este peligro se evita procurando que la superficie del recipiente sea superior a un metro por cada 1500 ó 1800 voltios que deban consumirse.

Reóstato líquido flotante. — Cuando el reóstato líquido se ha de emplear en consumir grandes potencias, su funcionamiento exige constante renovación del líquido, lo que constituye grave dificultad.

Para consumir toda la potencia producida por una central hidroeléctrica, M. Sartori empleó un reóstato flotante, aprovechando la condición de disponer de gran caudal de agua en constante renovación.

La descripción de este sistema se publicó en *Elektrotechnik und Maschinenbau*, en 1911.

Los tres electrodos correspondientes a las tres fases de la corriente, se suspenden, mediante aisladores, de un bastidor flotante que tiene la forma de triángulo equilátero y todo ello flota en el canal por donde entra el agua a la central.

Los conductores que llevan la corriente a las placas, deben disponerse de manera que sean algo extensibles, para seguir al triángulo flotante cuando se sumerja.

El bastidor flotante se compone de tres tubos de hierro formando un triángulo, cuyos vértices están constituídos por grandes toneles vacíos. El hueco interior de los tubos y toneles comunica mediante un tubo flexible de caucho, con una bomba de aire. Los toneles están agujereados en su parte inferior, para que pueda penetrar en ellos el agua.

Mediante la bomba, podemos inyectar o extraer aire del interior del sistema flotante, haciendo que su línea de flotación varíe entre límites muy amplios, con lo cual los electrodos más o menos bañados por el agua, darán una resistencia variable como se desee, según las indicaciones de un vatímetro instalado en las líneas.

Este reóstato flotante ha funcionado con éxito en pruebas en las que debía absorberse una potencia de miles de kilovatios y con tensiones de 10000 voltios.

CAPITULO III

CALENTAMIENTO DE LAS RESISTENCIAS

Efecto Joule. — En el tomo I, página 103, dijimos ya que si una corriente eléctrica circula por un conductor sin efectuar trabajo mecánico alguno, toda la energía consumida en el circuito se transforma en calor. Al calentamiento de los conductores por el paso de la corriente eléctrica se le llama efecto Joule.

La potencia transformada en calor por una corriente de V voltios e I amperios, que atraviesa una resistencia R, es

$$W = VI$$

Recordando que según la ley de Ohm (tomo I, página 97) se tiene

$$V = RI \qquad \text{o} \qquad I = \frac{V}{R}$$

podremos poner la potencia en una de las dos formas siguientes:

$$W = R I^2 \quad \text{o} \quad W = \frac{V^2}{R}$$

A esta potencia corresponde un trabajo durante un tiempo t, que podrá expresarse en cualquiera de las formas siguientes:

$$J = V I t \qquad J = R I^2 t \qquad J = \frac{V^2 t}{R}$$

Enfriamiento de conductores. — Todo cuerpo caliente pierde su calor por las tres causas siguientes:

Radiación es la transmisión del calor a distancia siguiendo las mismas leyes que la luz, es decir, emitiendo una intensidad inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Si el calor de la estufa llega a nosotros es precisamente por radiación. Por eso se llaman *radiadores* a los tubos de aletas en que terminan las distribuciones de calefacción central por agua o vapor.

Conducción es la transmisión de calor del cuerpo caliente a los sólidos que le tocan. La vasija que hierve apoyada en la plancha de la cocina económica, recibe el calor por conducción.

Convección es la transmisión del calor que posee el cuerpo caliente, a los flúidos que le rodean y que se renuevan sobre su superficie, precisamente por la temperatura que adquieren. Una resistencia colocada en el fondo de un baño de agua, calienta el agua que la rodea, y el agua caliente se eleva en el baño dejando sitio para nueva agua fría. La resistencia se enfría entonces por convección.

Los conductores que forman las resistencias, se ponen sin contacto con otro sólido conductor, por lo tanto, su enfriamiento ha de verificarse solamente por radiación y por convección.

Según Dulong y Petit, un cuerpo caliente radía por cada metro cuadrado de su superficie, durante una hora,

$$c_1 = 125\, a\, (1'0077^{\Theta} - 1'0077^{\theta}) \text{ calorías.}$$

siendo Θ y θ las temperaturas del metal y del ambiente, y a una constante que depende del estado de la superficie radiante.

En el caso de conductores brillantes, a vale 0'26 y en el caso de conductores barnizados de negro, a vale 4.

Según los mismos autores, la pérdida de calor debida a la convección, es por hora y metro cuadrado de superficie

$$c_2 = 0'55\, b\, (\Theta - \theta)^{1.233} \text{ calorías,}$$

siendo b un coeficiente que depende de la ventilación a que esté sometido el conductor. Si no hay ventilación artificial, se toma $b = 4$ y si la ventilación es forzada se toma $b = 6$.

La pérdida total de calor que experimenta un conductor, por hora y por metro cuadrado de superficie, será

$$c_1 + c_2$$

Si la superficie es S y el tiempo es un segundo, la pérdida de calor será

$$C = \frac{S\,(c_1 + c_2)}{3600} \text{ kilocalorías}$$

Tomando el perímetro en milímetros y la longitud en metros, la superficie del conductor en metros cuadrados es

$$S = \frac{p\,l}{1000}$$

que substituída en la fórmula anterior nos da

$$C = \frac{p\,l\,(c_1 + c_2)}{1000 \times 3600} \text{ kilocalorías}$$

o también

$$C' = \frac{p\,l\,(c_1 + c_2)}{3600} \text{ gramocalorías}$$

Régimen estable de temperatura. — Un conductor eléctrico sometido a un efecto Joule, alcanzará el régimen estable de temperatura, es decir, conservará una temperatura constante, cuando la cantidad de calor que recibe por el paso de la corriente, sea igual a la que pierde por radiación y convección.

La potencia perdida por efecto Joule, puede expresarse en función de las dimensiones del conductor y de la resistividad de su metal

$$W = R\,I^2 = \rho\,\frac{l}{s}\,I^2$$

Estos vatios reducidos a calorías gramo grado serán (tomo II, pág. 170):

$$C'' = 0'24\,\rho\,\frac{l}{s}\,I^2$$

y la condición del régimen estable de temperatura será:

$$C' = C''$$

o sea,

$$\frac{p\,l\,(c_1 + c_2)}{3600} = 0'24\,\rho\,\frac{l}{s}\,I^2$$

que se reduce a

$$\frac{p\,(c_1 + c_2)}{3600} = 0'24\,\rho\,\frac{I^2}{s}$$

de donde

$$I = \sqrt{\frac{c_1 + c_2}{3600 \times 0'24 \times \rho}}\,\sqrt{p\,s}$$

y representando por A el primer radical puede escribirse

$$I = A\,\sqrt{p\,s} \qquad [1]$$

Si el conductor resistente es cilíndrico, el perímetro y la sección podrán expresarse en función del diámetro

$$p = \pi\,d \qquad s = \frac{\pi\,d^2}{4}$$

y la fórmula [1] toma la forma

$$I = A \sqrt{\pi d \times \frac{\pi d^2}{4}} = A \frac{\pi}{2} \sqrt{d^3}$$

que escribiremos así:

$$I = B \sqrt{d^3} \qquad [2]$$

Las fórmulas [1] y [2] sirven para calcular la intensidad que debe circular por un conductor dado para alcanzar una temperatura de régimen, también dada. Si quisiéramos calcular el conductor que conviene para alcanzar una temperatura con una corriente determinada, podríamos deducir de la [2]

$$d = \frac{\sqrt[3]{I^2}}{\sqrt[3]{B^2}}$$

que le daremos la forma

$$d = C \sqrt[3]{I^2} \qquad [3]$$

Cálculo de conductores resistentes. — Los reóstatos para la calefacción eléctrica, cuando se construyen metálicos, son siempre de mélchior.

Mr. Erlacher, en un trabajo publicado en *L'Electricien* de febrero de 1908, calcula las constantes A y B de las fórmulas anteriores, que convienen al mélchior, para alcanzar temperaturas de 100, 200, 300, 400 y 500 grados centígrados sobre el ambiente, escogiendo estos límites porque hasta 100 grados resisten perfectamente los aislantes usuales y después de los 500, los hilos de mélchior empiezan a ponerse rojos.

Se admite un valor de resistividad $\rho = 0'4$; una temperatura ambiente de 30 grados, y se supone que los aparatos de calefacción no tienen nunca ventilación forzada ($b = 4$).

Los valores de las constantes son dobles, correspondiendo a los casos extremos de superficie pulimentada ($a = 0'26$) y de superficie ennegrecida ($a = 4$).

$\Theta-\theta$	Superficie brillante			Superficie ennegrecida		
	A	B	C	A	B	C
100	1'13	1'78	0'621	1'57	2'46	0'547
200	1'97	3'10	0'470	2'91	4'57	0'363
300	2'68	4'21	0'383	4'36	6'84	0'277
400	3'33	5'23	0'331	6'15	9'66	0'220
500	3'81	5'98	0'303	7'46	11'71	0'193

Veamos algunas aplicaciones numéricas de estas fórmulas.

EJEMPLO 1.º — *Una cinta de mélchior que tiene* 20 *mm. de ancho por* 0'5 *de grueso, puede alcanzar una temperatura de* 300 *grados sobre el ambiente, por efecto Joule ¿qué corriente debe circular por ella?*

Dados el ancho y el grueso de la cinta, pueden calcularse el perímetro y la sección:

$$p = 2\ (20 + 0'5) = 41 \text{ mm.}$$
$$s = 20 \times 0'5 = 10 \text{ mm.}^2$$

Si suponemos que la superficie de la cinta es brillante, tomaremos de la tabla anterior el valor

$$A = 2'68$$

y aplicando la fórmula [1] tendremos:

$$I = 2'68 \sqrt{41 \times 10} = 54 \text{ amperios.}$$

Resulta una densidad de corriente de

$$\delta = \frac{54}{10} = 5'4 \ amp./mm.^2$$

EJEMPLO 2.º— *Con hilo de mélchior que tiene 2 milímetros de diámetro, se desea construir una resistencia que alcance una temperatura sobre el ambiente de 500 grados. ¿Cuántos amperios deberán circular por el conductor?*

Supongamos que el hilo está ennegrecido y tomaremos de la tabla anterior el valor $B = 11'71$. Aplicando la fórmula [2], se tendrá:

$$I = 11'71 \sqrt{2^3} = 32 \text{ amperios.}$$

A un diámetro de 2 mm. corresponde una sección de 3'14 mm.², luego la densidad de corriente será:

$$\delta = \frac{32}{3'14} = 10'2 \ amp./mm.^2$$

EJEMPLO 3.º — *Con 8 amperios se desea calentar un hilo brillante, de mélchior, hasta los 400 grados. ¿Qué diámetro debe tener el conductor?*

Para aplicar la fórmula [3] tomaremos de la tabla numérica el coeficiente $C = 0'331$ y tendremos:

$$d = 0'331 \sqrt[3]{8^2} = 1'3 \, mm.$$

A este diámetro corresponde una sección de 1'3 mm.² y, por lo tanto, en el conductor tendremos una densidad de corriente

$$\delta = \frac{8}{1'3} = 6'1 \, amp./mm.^2$$

EJEMPLO 4.º — *Calcular una resistencia de mélchior brillante para una estufa eléctrica. Se desea que el hilo llegue a 300 grados consumiendo 500 vatios a 100 voltios.*

La corriente debe ser de 5 amperios y el valor de C para aplicar la fórmula [3] es $C = 0'383$. Tendremos:

$$d = 0'383 \sqrt[3]{5^2} = 1'1 \, mm.$$

A este diámetro corresponde una sección de 0'95 mm.²

La resistencia, para que circulen 5 amperios, debe ser

$$R = \frac{100}{5} = 20 \text{ ohmios}$$

y la longitud del hilo resistente

$$l = \frac{R\,s}{\rho} = \frac{20 \times 0'95}{0'3} = 63 \text{ metros.}$$

Si la corriente se paga a 40 céntimos el kilovatio-hora, esta estufa gastará 20 céntimos por hora.

Cálculo de aparatos para calefacción. — Vamos a calcular la potencia que debe consumir una estufa eléctrica, según el recinto que debe calentar y la temperatura que se desea.

La estufa eléctrica debe consumir cierto número de vatios en calentar, con alguna prontitud, el aire contenido en el recinto, y conseguido este efecto, bastará consumir los vatios precisos para que el aire no se enfríe, es decir, bastará producir el calor que se pierde a través de los muros, suelo y techo de la habitación.

Vamos a estudiar separadamente, cada uno de estos tiempos.

La capacidad térmica del aire a presión constante, vale 0'238 gramocalorías o *termios* y el metro cúbico de aire pesa 1293 gramos, luego para elevar un grado la temperatura de un metro cúbico de aire, se necesitan

$$0'238 \times 1293 = 307'734 \text{ termios.}$$

Para que *m* metros cúbicos de aire pasen de la temperatura Θ a la θ se necesitarán

$$C = 307'734\ (\Theta - \theta)\ \text{m.}$$

Las calorías se relacionan con los julios mediante la fórmula (tomo II, pág. 170).

$$C = 0'24\,J = 0'24\,Wt,$$

y expresando t en horas

$$C = 0'24\,W\,3600\,t.$$

e igualando ambos valores de C

$$307'734\,(\Theta - \theta)\,m = 0'24\,W\,3600\,t,$$

de donde

$$W = \frac{307'734}{0'24 \times 3600} \quad \frac{(\Theta - \theta)\,m}{t}$$

$$= 0'356\,\frac{(\Theta - \theta)\,m}{t} \quad \mathrm{w}\,/\,h \quad [1]$$

que será la potencia consumida para calentar el aire.

Calculemos ahora el calor que pierde el aire de un recinto, por enfriamiento a través de sus paredes.

Una pared de s metros cuadrados, que esté sometida a una temperatura de Θ grados en su cara interior, y a θ grados en su cara exterior, pierde por hora un número de termios dado por la fórmula

$$C = k\,s\,t\,(\Theta - \theta)\,10^3$$

Igualando este valor con el ya conocido

$$C = 0'24\,W\,3600\,t,$$

se obtiene

$$W = \frac{k\,s\,(\Theta - \theta)\,10^3}{0'24 \times 3600} = 1'16\,k\,s\,(\Theta - \theta) \qquad [2]$$

El valor de k depende de la naturaleza de las paredes. He aquí los más usuales:

Tabique de 13 cm.	k = 1'8
— — 25 —	1'28
— — 38 —	1'04
— — 51 —	0'86
— — 64 —	0'73
Puertas de 5 —	2'5
Abertura acristalada	2'52
— con dobles vidrieras.	1'68
Muros de piedra de 20 cm....	3'32
— — — — 30 —...	2'66
— — — — 40 —...	2'28
— — — — 50 —...	2'00
— — — — 60 —...	1'77
— — — — 80 —...	1'45
— — — — 100 —...	1'21

Cálculo de intensidades. — Conocida la potencia necesaria en la estufa, puede calcularse la intensidad que debe circular por los hilos resistentes mediante las fórmulas siguientes.

Si la corriente de alimentación es continua, la expresión de la potencia es (tomo I, pág. 101)

$$W = I\,V,$$

de donde

$$I = \frac{W}{V}.$$

Si la corriente es alterna simple, se tiene (tomo II, página 37)

$$W = VI \cos \varphi \qquad I = \frac{W}{V \cos \varphi}.$$

Si la corriente es trifásica (tomo II, pág. 90)

$$W = \sqrt{3}\, V\, I \cos\varphi \qquad I = \frac{W}{\sqrt{3}\, V \cos\varphi}$$

La corriente por conductor será I o $I\sqrt{3}$ según que las tres fases estén conexionadas en estrella o en triángulo.

Si los conductores resistentes forman hélices, deberá asignarse a cos φ un valor 0'7 ó 0'8. Si se evita el efecto de autoinducción, haremos cos $\varphi = 1$.

EJEMPLO. — *Calcular una estufa eléctrica para que en una hora, eleve la temperatura* 15 *grados sobre el ambiente, de una habitación de* 80 *m.*³ *que tiene* 50 *m.*² *de muro de* 40 *cm.;* 40 *m.*² *de tabique de* 25, *y* 10 *m.*² *de puerta y abertura acristalada.*

La potencia que debe consumirse durante la primera hora, será según la fórmula [1]

$$W = 0'356\, \frac{15 \times 80}{1} = 427 \text{ vatiohoras.}$$

Los vatios perdidos por los 50 m.² de muro serán según la fórmula [2]

$$W_1 = 1'16 \times 2{,}28 \times 50 \times 15 = 1983.$$

Los vatiohoras perdidos por el tabique

$$W_2 = 1'16 \times 1'28 \times 40 \times 15 = 890$$

Los vatios perdidos por puerta y abertura

$$W_3 = 1'16 \times 2'5 \times 10 \times 15 = 435$$

La pérdida total es

$$\begin{aligned} W_1 &= 1983 \\ W_2 &= 890 \\ W_3 &= \underline{435} \\ & 3308 \text{ vatiohoras.} \end{aligned}$$

Construiremos una estufa que consuma

$$427 + 3308 = 3735 \text{ vatios}$$

y podremos, después de la primera hora, suprimir hélices para reducir su consumo a 3308 vatios, o bien, puede construirse una estufa que tenga un consumo permanente de la semisuma del máximo

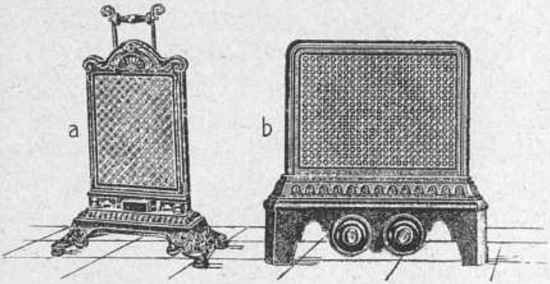

Fig. 12

y mínimo calculados; unos 3500 vatios próximamente en nuestro ejemplo.

En la figura 12 se representan dos estufas, viéndose en la segunda dos interruptores para tener el gasto total o el de conservación sencillamente.

Aparatos de calefacción eléctrica. — El calentamiento de resistencias, que acabamos de estudiar, permite construir aparatos variadísimos de calefacción eléctrica que tendrán sobre los otros sistemas de calefacción las inmensas ventajas de comodidad, limpieza, carencia de humos y cenizas, fácil regulación del calor, etc., etc.

No puede hacerse una comparación económica exacta de este medio de calefacción con los otros medios empleados, ya que el precio de la corriente eléctrica varía enormemente según el procedimiento de obtención.

Si la corriente se produce por fuerza hidráulica, la calefacción eléctrica será la más económica.

Si la corriente se produce por combustión de carbón, forzosamente ha de resultar muy cara la calefacción, porque la transformación del carbón en calor es sumamente indirecta; el carbón se transforma en calor, el calor en vapor, el vapor en fuerza mecánica, la fuerza en movimiento, el movimiento en corriente y la corriente en calor. Por buenos que sean los rendimientos de cada una de estas transformaciones intermedias, el rendimiento total, como producto de rendimientos, ha de ser forzosamente muy bajo.

Los aparatos de calefacción eléctrica reciben formas y disposiciones muy distintas, según el objeto a que se destinan.

La figura 13*a* representa un calentador para tenacillas de rizar, construído por la *General Electric de España*. Siendo fino y largo el objeto que se pretende calentar, la resistencia podrá disponerse en una sola hélice rodeando el objeto, y cubierta por una superficie protectora para evitar las pérdidas por radiación del calor.

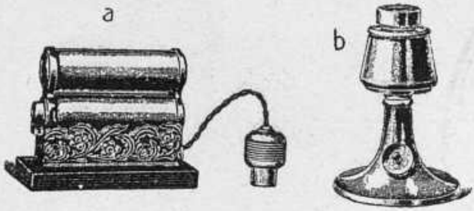

Fig. 13

El aparato *b* es un encendedor de cigarros. El calor debe concentrarse en un punto, y para ello se dispone una resistencia en ziszás o en espiral, alojada en la parte superior del aparato, cubierta por una hoja de mica. La temperatura alcanzada por la resistencia, debe ser aquí superior a los 500 grados, porque se desea que se ponga al rojo. Esta condición reduce muy notablemente la longitud del hilo resistente y permite alojarla en pequeño espacio.

La figura 12 representa dos estufas eléctricas construídas en la casa *Electricité et Electromécanique* de Bruselas. En ellas las resistencias pueden disponerse en varias hélices, encerradas en una caja protectora con múltiples orificios para facilitar la salida del calor producido.

La figura 14 representa un hornillo construído por la casa Wegmann de Berna. Las resistencias se colocan bajo la plancha de hierro en que se ponen las cacerolas. Se aconseja que las vasijas empleadas con estos hornillos tengan los fondos lo más planos

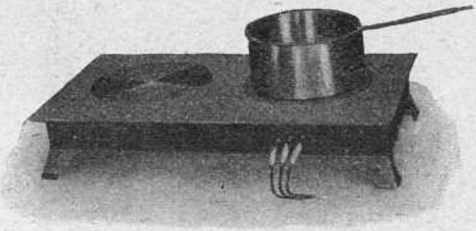

Fig. 14

posible, con objeto de aprovechar mejor el calor producido.

Si disponen los enchufes de manera que puedan ponerse en circuito distinto número de hélices según el calor que se desee.

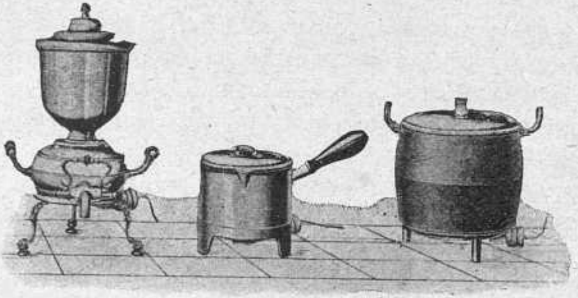

Fig. 15

En la figura 15 se representan diversos utensilios de cocina, construídos por la *General Electric de*

España, provistos todos ellos de resistencias calentadoras, de manera que no necesitan hornillo para funcionar.

Una curiosa aplicación de la calefacción eléctrica es la incubadora artificial construída por la casa *A. E. G.* y representada en la figura 16.

Fig. 16

Los constructores aseguran que en la construcción de las incubadoras eléctricas se ha procurado ante todo obtener una imitación lo más exacta posible de los fenómenos que se desarrollan en la incubación natural. Ofrecen estos aparatos la mayor garantía de obtener elevado rendimiento, es decir, que en condiciones normales se puede contar con que un 80 por 100 de los huevos sometidos a incubación llegarán a buen término.

La temperatura de la incubación en los apratos eléctricos es tan uniforme como pueda serlo con cualquier otro sistema de calefacción, puesto que se regula automáticamente hasta la décima de grado, incluso en los casos en que la corriente está sometida a variaciones de voltaje. Dicha regulación se realiza automáticamente en períodos de dos a cinco minutos, interrumpiéndose o conectándose de nuevo la corriente productora del calor. En esta forma, la circulación de aire que entra por la parte inferior del aparato y sale por la parte superior, está sometida a intermitencias que la experiencia ha demostrado son de muy favorable influencia en el buen desarrollo de la incubación.

El servicio de estos aparatos es sencillísimo, puesto que se limita a la aireación y cambio de posición en los huevos.

Con objeto de que al abrir la incubadora los huevos no sufran sacudidas que son de perniciosa influencia en la incubación, está suprimido el empleo de cajones, de manera que para abrir la incubadora hay que servirse de una ventanilla. A fin de poder abrir el aparato sólo parcialmente, se puede trasladar dicha ventana a un lado o a la parte posterior.

Para comprobar la temperatura de incubación se coloca un termómetro sobre los huevos, de modo que sin necesidad de abrir el aparato pueden leerse en cualquier momento las temperaturas respectivas.

Por medio de una sencilla disposición se puede regular la humedad y la corriente del aire.

Las incubadoras pueden ser empleadas para las más diversas clases de huevos.

Consumo de algunos aparatos. — Para que sirva de guía en la construcción o instalación de aparatos de calefacción eléctrica, damos el consumo de algunos de ellos.

Calientaplatos pequeño	2	hw.
— grande	6	—
Cafetera de medio litro	4'50	—
— — un —	6	—
Cacerolas de medio litro	3	hw.
— — un —	5	—
— — cinco —	8	—
Plancha de 2'5 kilogramos.....	4	—
— — 3'5 —	5	—
Soldadores de 345 × 25 mm ..	1'8	—
— — 260 gramos	1	—
Calentador de tenacillas	1'25	—
— — cama	5	—
— — baño	8	—
Asador	10	—
Horno de pastelero	10	—
Brasero pequeño	13	—
— grande	35	—

CAPÍTULO IV

Reóstatos para dínamos shunt

Objeto. — En la instalación de una dínamo de corriente continua, se emplea el reóstato como regulador de tensión para *mantener constante la diferencia de potencial entre dos puntos* (escobillas o centros de alimentación). Si la tensión varía con el gasto de corriente o con la velocidad, debe procurarse que la mayor variación $V - V'$ sea igual a un tanto por ciento t de la tensión normal, es decir, que

$$\frac{V - V'}{V} = t\,.$$

Dínamo excitada en derivación. — Si la dínamo está excitada en derivación, como se representa en la figura 17, el reóstato R debe ponerse en serie con el inductor D. Cuando disminuya la resistencia de circuito exterior, es decir, cuando aumente la corriente en el circuito exterior, disminuirá la corriente de excitación y deberemos reducir la resistencia del reóstato R. Del mismo modo, cuando disminuya el gasto en el circuito exterior aumentará la corriente de excitación y deberemos aumentar la resistencia del reóstato.

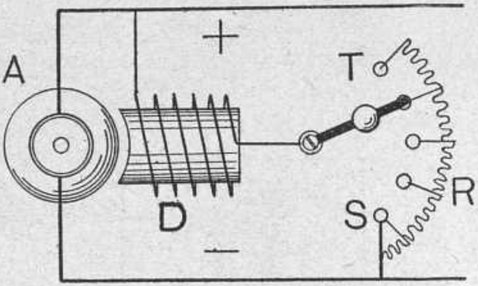

Fig. 17

Si nos referimos a la indicación del voltímetro, podemos decir que *cuando la tensión baje, debe disminuirse la resistencia de R, y cuando la tensión suba, debe aumentarse la resistencia de R.*

Funcionamiento a velocidad constante y carga variable. — Cuando la dínamo ha de funcionar con carga variable se calculan los inductores de manera *que produzcan la tensión normal para la carga máxima,* de modo que cuando la máquina produce todo su amperaje, la palanca del reóstato debe estar en el tope *S* (sin resistencia).

Para calcular el reóstato que conviene a una dínamo dada, procederemos experimentalmente con un montaje que se indica en la figura 18. Los dos terminales de la dínamo *A* se llevan a un reóstato líquido *N*, de los empleados en los talleres, intercalando en el circuito un amperímetro *I*, que nos permita apreciar en cualquier momento la carga de la máquina.

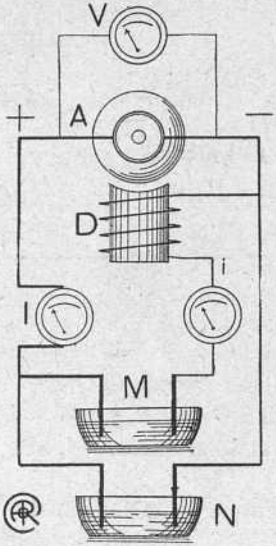

Fig. 18

El circuito de excitación *D* se cierra también a través de un reóstato líquido *M*, con otro amperímetro *i* intercalado en el circuito.

Un voltímetro *V* derivado entre las escobillas de la dínamo, nos dará la tensión.

Se arregla la resistencia *N* para que el amperímetro *I* nos marque la corriente máxima que la máquina debe producir. A la vez se arregla la resistencia M para que V nos marque la tensión normal.

Conseguidas las convenientes indicaciones en I y en V, se anota la corriente marcada en i que llamaremos i_h.

Si los inductores de la dínamo están bien calculados, la resistencia M debe ser ahora nula, de manera que, según la fórmula de Ohm, debe verificarse en el circuito de excitación

$$i_h = \frac{V}{d} \quad \text{o} \quad d = \frac{V}{i_h}, \qquad [1]$$

siendo V la tensión normal y d la resistencia de la excitación.

Aumentemos la resistencia N, hasta que la tensión indicada por el voltímetro suba a V' que es la máxima tolerada. Aumentemos también la resistencia M para que la tensión vuelva nuevamente a ser la normal V, y conseguido esto, anotemos la corriente de excitación que llamaremos i_{h-1}.

Para esta carga, inferior a la máxima, el reóstato R de la figura 17 debe ya intercalar la última hélice en el circuito de excitación. De manera que la resistencia actual del circuito de excitación será $d + R_h$ y tendremos

$$d + R_h = \frac{V}{i_{h-1}}. \qquad [2]$$

Aumentemos nuevamente la resistencia N hasta que la tensión suba otra vez a V', y aumentemos nuevamente la resistencia M hasta reducir la tensión V' a su valor normal V. El amperímetro i nos indicará una corriente de excitación i_{h-2}

Para esta tercera carga, el reóstato de la figura 17 debe ya intercalar dos últimas hélices. De manera que la resistencia del circuito de excitación será ahora

$$d + R_h + R_{h-1} = \frac{V}{i_{h-2}} \qquad [3]$$

Continuaremos operando del mismo modo hasta conseguir que el amperaje de la dínamo, marcado por el amperímetro I, sea mínimo o nulo. Entonces el amperímetro i nos marcará una corriente mínima i_0, y como para esta carga, el reóstato R de la figura 17 debe tener todas sus hélices en el circuito de excitación, se verificará

$$d + R_h + R_{h-1} + \ldots + R_1 = \frac{V}{i_0} \qquad [4]$$

Restando miembro a miembro las igualdades [2] y [1] se obtiene:

$$R_h = \frac{V}{i_{h-1}} - \frac{V}{i_h}. \qquad [5]$$

Restando miembro a miembro las igualdades [3] y [2] se obtiene:

$$R_{h-1} = \frac{V}{i_{h-2}} - \frac{V}{i_{h-1}}. \qquad [6]$$

Combinando del mismo modo todas las demás igualdades, se obtiene

$$R_{h-2} = \frac{V}{i_{h-3}} - \frac{V}{i_{h-2}} \; \ldots \; R_1 = \frac{V}{i_0} - \frac{V}{i_1} \qquad [7]$$

Estas últimas fórmulas permiten conocer las resistencias de cada una de las hélices componentes del reóstato.

La resistencia total será la suma de las resistencias componentes, y vale

$$R = \frac{V}{i_o} - \frac{V}{i_h} \,. \qquad [9]$$

Los diámetros de los conductores resistentes se calcūlarán como reguladores, según se dijo en el capítulo II, teniendo en cuenta que por la última hélice R_h, circula una corriente máxima i_{h-1}; por la penúltima R_{h-1}, una corriente i_{h-2} y así sucesivamente hasta la primera hélice R_1 por la cual circula una corriente máxima i_o.

Ejemplo. — *Calcular el reóstato de excitación para una dínamo que debe producir* 120 *voltios, con una velocidad constante y una carga variable de cero á* 100 *amperios.*

Supongamos que la tensión máxima consentida es de 123 voltios.

La serie de experimentos estudiados anteriormente, supongamos que nos dan para esta máquina los siguientes valores de la corriente de excitación:

$i_{10} = 3$	$i_9 = 2'98$	$i_8 = 2'93$
$i_7 = 2'88$	$i_6 = 2'83$	$i_5 = 2'78$
$i_4 = 2'72$	$i_3 = 2'66$	$i_2 = 2'60$
$i_1 = 2'55$	$i_0 = 2'50$	

La resistencia del inductor deberá ser

$$d = \frac{120}{3} = 40 \text{ ohmios,}$$

y si no lo es exactamente, deberá ponerse una resistencia adicional para que lo sea.

Las hélices componentes serán:

$$R_{10} = \frac{120}{2'98} - \frac{120}{3} = 0'27$$

$$R_9 = \frac{120}{2'93} - \frac{120}{2'98} = 0'68$$

$$R_8 = \frac{120}{2'88} - \frac{120}{2'93} = 0'71$$

$R_7 = 0'74$ $R_6 = 0'77$ $R_5 = 0'94$
$R_4 = 1$ $R_3 = 1'04$ $R_2 = 0'91$
$R_1 = 0'94$

Como comprobación del cálculo puede hallarse el valor de la resistencia total mediante la fórmula [9]

$$R = \frac{120}{2'50} - \frac{120}{3} = 8$$

La suma de las componentes es 8, luego puede aceptarse el cálculo.

Supongamos que el reóstato se va a construir con hilos de mélchior y determinaremos los diámetros mediante la fórmula establecida en el capítulo II.

$$d = 0'035 \sqrt[3]{I^2}$$

teniendo en cuenta la mayor corriente que circula por cada una de las hélices.

Así resulta:

$$d_{10} = 0'035 \sqrt[3]{2'98^2} = 0'0729 \text{ cm.}$$

$$d_9 = 0'035 \sqrt[3]{2'93^2} = 0'0716 \text{ —}$$

$$d_8 = 0'035 \sqrt[3]{2'88^2} = 0'0708 \text{ —}$$

$$d_7 = 0'035 \sqrt[3]{2'83^2} = 0'0700 \text{ —}$$

$$d_6 = 0'035 \sqrt[3]{2'78^2} = 0'0692 \text{ —}$$

$$d_5 = 0'035 \sqrt[3]{2'72^2} = 0'0680 \text{ —}$$

$$d_4 = 0'035 \sqrt[3]{2'66^2} = 0'0761 \text{ —}$$

$$d_3 = 0'035 \sqrt[3]{2'60^2} = 0'0661 \text{ —}$$

$$d_2 = 0'035 \sqrt[3]{2'55^2} = 0'0653 \text{ —}$$

$$d_1 = 0'035 \sqrt[3]{2'50^2} = 0'0644 \text{ —}$$

A estos diámetros corresponden las secciones, en milímetros cuadrados

$s_{10} = 0'42$	$s_5 = 0'36$
$s_9 = 0'40$	$s_4 = 0'35$
$s_8 = 0'39$	$s_3 = 0'34$
$s_7 = 0'38$	$s_2 = 0'33$
$s_6 = 0'37$	$s_1 = 0'32$

con estas secciones y con las resistencias que ya conocemos, calcularemos las longitudes de las hélices, mediante la fórmula

$$l = \frac{R\,s}{\rho}.$$

Tendremos:

$$l_{10} = \frac{0'78 \times 0{,}42}{0{,}3} = 0'38 \text{ metros}$$

$l_9 = 0'91$	$l_8 = 0'92$	$l_7 = 0'935$
$l_6 = 0'95$	$l_5 = 1'13$	$l_4 = 1'16$
$l_3 = 1'18$	$l_2 = 1$	$l_1 = 1$

Cálculo abreviado. — Hemos desarrollado los cálculos anteriores, con todo detalle para examinar atentamente los resultados y deducir las abreviaciones que pueden aceptarse en la práctica.

Los experimentos preliminares del cálculo son necesarios para determinar las intensidades de excitación $i_h\ i_{h-1} \ldots i_o$ y su número, que es el número de hélices que ha de tener el reóstato, más uno.

Con estos valores experimentales calculamos las resistencias componentes $R_h\ R_{h-1} \ldots R_1$ y examinando los valores obtenidos, podemos fijar un valor medio para todas las intensidades de excitación, y un valor medio para todas las resistencias de las hélices. De este modo, todos los hilos resultarán del mismo diámetro y de la misma longitud.

Si los valores experimentales de i y los calculados de R fuesen muy distintos unos de otros, podríamos hacer con ellos dos o más grupos, substituyendo todos los valores de un grupo por su media aritmética. En este caso deberíamos calcular los diámetros y longitudes de los hilos resistentes para cada uno de los grupos.

En el ejemplo numérico antes resuelto, podemos tomar como valor único para la corriente de excitación

$$i = 2'75 \text{ amperios}$$

y para todas las resistencias componentes

$$r = 0'85 \text{ ohmios}$$

El diámetro único para los hilos de todas las hélices será:

$$d = 0'035 \sqrt[3]{2'75^2} = 0'069 \text{ cm.},$$

o sea

$$d = 0'7 \text{ mm.}$$

y, por lo tanto,

$$s = 0'37 \text{ mm.}^2$$

La longitud de hilo resistente empleado en cualquiera de las hélices, será:

$$l = \frac{0'85 \times 0'37}{0'3} = 1'04 \text{ metros.}$$

Cálculo de los topes de contacto. — La palanca del reóstato y los topes sobre los cuales se apoya, forman un contacto muy poco seguro y, por lo tanto, deberá calcularse su superficie común, admitiendo un corto número de amperios por milímetro cuadrado, es decir, fijando muy baja la *densidad de corriente.*

Generalmente se admite para estos cálculos 0'2 ó 0'4 amperios por milímetro cuadrado.

En el ejemplo numérico antes resuelto, la mayor corriente que circula por el reóstato es de 3 amperios; fijemos la densidad en 0'25 y tendremos la superficie de los topes:

$$\frac{3}{0'25} = 12 \text{ mm.}^2,$$

luego serán suficientes unos topes circulares de 4 mm. de diámetro.

Queda el reóstato completamente calculado.

Funcionamiento con carga constante y velocidad variable. — Cuando la dínamo ha de funcionar a velocidad variable, se calculan los inductores de manera *que produzcan la tensión normal cuando se tenga la velocidad mínima,* de modo que para esta mínima velocidad, la palanca del reóstato R (figura 17) debe estar en el tope S (sin resistencia).

Para calcular el reóstato que conviene a una dínamo dada, procederemos primeramente a una serie de determinaciones experimentales, análogas a las efectuadas en el caso de carga variable, mediante un montaje igual al de la figura 18.

Puesta en marcha la dínamo A con su velocidad mínima n_o, arreglaremos los reóstatos M y N para conseguir que el voltímetro V marque la tensión normal, y el amperímetro I la carga constante que debe tener la dínamo.

Conseguidas las convenientes indicaciones en V y en I, se anota la corriente de excitación i_h marcada en el amperímetro i, que será la mayor corriente de excitación que hemos de emplear.

Si los inductores de la dínamo están bien calculados, la resistencia M debe ser cero en esta posición del reóstato N y con la velocidad n_o y según la ley de Ohm debe verificarse:

$$i_h = \frac{V}{d} \quad \text{ó} \quad d = \frac{V}{i_h}. \qquad [10]$$

Si la resistencia M no fuese nula, el valor d sería el de los inductores más una resistencia adicional, fija, que deberemos poner en serie con ellos.

Aumentemos la velocidad de rotación de la máquina, hasta que la tensión indicada por V suba al máximo tolerado V'. Entonces aumentemos la resistencia M hasta que la tensión V' vuelva a ser la normal V y anotemos la intensidad i_{h-1} indicada por el amperímetro i.

Para esta velocidad de la dínamo, el reóstato R de la figura 17, debe ya intercalar la última hélice R_h en el circuito de excitación; de manera que la resistencia actual de este circuito será $d + R_h$, y tendremos:

$$d + R_h = \frac{V}{i_{h-1}}. \qquad [11]$$

Aumentemos nuevamente la velocidad de la máquina hasta que la tensión suba otra vez a V', y volvamos a aumentar la resistencia M hasta reducir la tensión V' a su valor normal V. El amperímetro i nos indicará una corriente de excitación i_{h-2}.

Para este tercer valor de la velocidad, el reóstato R de la figura 17 debe intercalar ya dos últimas hélices. De manera que la resistencia del circuito de excitación será ahora

$$d + R_h + R_{h-1} = \frac{V}{i_{h-2}}. \qquad [12]$$

Continuaremos operando del mismo modo, hasta llegar a dar a la dínamo la velocidad máxima. Entonces el amperímetro i nos marcará una corriente mínima de excitación i_o y como el reóstato R de la figura 17, debe intercalar ya todas sus hélices en el circuito de excitación, se verificará:

$$d + R_h + R_{h-1} + \dots + R_1 = \frac{V}{i_o}. \qquad [13]$$

Restando miembro a miembro las igualdades [11] y [10] se obtiene:

$$R_h = \frac{V}{i_{h-1}} - \frac{V}{i_h}. \qquad [14]$$

Restando miembro a miembro las igualdades [12] y [11] se obtiene:

$$R_{h-1} = \frac{V}{i_{h-2}} - \frac{V}{i_{h-1}}. \qquad [15]$$

Combinando del mismo modo las demás igualdades, se obtiene

$$R_{h-2} = \frac{V}{i_{h-3}} - \frac{V}{i_{h-2}}, \qquad [16]$$

. . . .

$$R_1 = \frac{V}{i_o} - \frac{V}{i_1}, \qquad [17]$$

Así tendremos fórmulas para calcular las resistencias de cada una de las hélices componentes del reóstato.

La resistencia total será la suma de todas las componentes y vale

$$R = \frac{V}{i_o} - \frac{V}{i_h}. \qquad [18]$$

Para calcular los diámetros de los conductores resistentes, emplearemos el procedimiento indicado en el capítulo II para los reguladores, teniendo en cuenta que por la última hélice R_h, circula una corriente máxima i_{h-1}; por la penúltima R_{h-1}, circula una corriente máxima i_{h-2}, y así sucesivamente, hasta la primera hélice R_1 por la cual circula una corriente máxima i_0.

EJEMPLO. — *Calcular el reóstato de excitación para una dínamo shunt, que debe producir constantemente* 100 *amperios a* 120 *voltios, pudiendo variar su velocidad entre* 900 *y* 1,000 *revoluciones por minuto y tolerándose un aumento de tensión hasta los* 123 *voltios.*

Por el método experimental que hemos expuesto, determinaremos las corrientes de excitación necesarias para cada una de las velocidades que exigen regulación. Sean éstas.

$$i_{10} = 3'04 \qquad i_9 = 2'98 \qquad i_8 = 2'93$$
$$i_7 = 2'87 \qquad i_6 = 2'81 \qquad i_5 = 2'76 \qquad i_4 = 2'70$$
$$i_3 = 2'65 \qquad i_2 = 2'60 \qquad i_1 = 2'55 \qquad i_0 = 2'50$$

y aplicando las fórmulas conocidas:

$$R_{10} = \frac{120}{2'98} - \frac{120}{3'04} = 0'79 \qquad R_9 = 0'81$$

$$R_8 = 0'82 \qquad R_7 = 0'83 \qquad R_6 = 0'86 \qquad R_5 = 0'87$$
$$R_4 = 0'88 \qquad R_3 = 0'91 \qquad R_2 = 0'92 \qquad R_1 = 0'94$$

La resistencia total, calculada mediante la fórmula [18], es

$$R = \frac{120}{2'50} - \frac{120}{3'04} = 8'53,$$

que es efectivamente igual a la suma de las resistencias componentes.

En vista de los valores hallados para la corriente de excitación y para las resistencias de las hélices, vamos a construir el reóstato con cinco hélices iguales entre sí:

$$R_{10} = R_9 = R_8 = R_7 = R_6 = 0{,}83\,,$$

y otras cinco iguales entre sí:

$$R_5 = R_4 = R_3 = R_2 = R_1 = 0{,}90\,.$$

Las primeras las calcularemos para ser atravesadas por una corriente máxima:

$$i_9 = i_8 = i_7 = i_6 = i_5 = 2{,}98\,,$$

y las segundas para

$$i_4 = i_3 = i_2 = i_1 = i_0 = 2{,}70\,.$$

Si el reóstato se va a construir con hilos de mélchior, determinaremos los diámetros mediante las fórmulas conocidas:

$$d_{10} = 0{,}035 \sqrt[3]{2{,}98^2} = 0{,}073 \text{ cm.}$$

$$d_5 = 0{,}035 \sqrt[3]{2{,}70^2} = 0{,}068 \text{ —}$$

A estos diámetros corresponden las secciones

$$s_{10} = 0{,}42 \quad mm.^2$$

$$s_5 = 0{,}36 \quad \text{—}$$

Con estas secciones y con los valores de las resistencias, calcularemos las longitudes de los hilos resistentes para formar las hélices

$$l_{10} = \frac{0'83 \times 0'42}{0'3} = 1'16 \text{ m.}$$

$$l_5 = \frac{0'90 \times 0'36}{0'3} = 1'08 \text{ —}$$

Los topes de contacto para construir el reóstato, podrán ser los mismos calculados en el ejemplo numérico del caso de carga variable, es decir, con un diámetro de 4 mm. por lo menos. Queda el reóstato completamente calculado.

Funcionamiento con carga y velocidad variables. Consideremos el caso más desfavorable para una dínamo que funcione con una carga que varíe entre I_o e I_h amperios y una velocidad que pueda oscilar entre n_o y n_h vueltas.

Al construir la dínamo, calcularemos los inductores de manera *que produzcan la tensión normal cuando la máquina funcione a la velocidad mínima* n_o *y la carga máxima* I_h. Entonces necesita la máquina su máxima excitación, de manera que el reóstato regulador del campo magnético debe tener su palanca en el tope S (*sin resistencia*) (figura 17).

Procedamos también en este caso experimentalmente, mediante el montaje que se indica en la figura 18.

Pongamos la máquina en marcha con su velocidad mínima n_0 y arreglemos el reóstato N para que el amperímetro I marque la corriente máxima I_h y el reóstato M para tener en V la tensión normal. Observemos la corriente de excitación i_H indicada por el amperímetro i, y si los inductores están bien calculados, deberá cumplirse la relación de Ohm:

$$i_H = \frac{V}{d} \quad \text{o} \quad d = \frac{V}{i_H}.$$

Aumentemos la velocidad hasta la máxima y arreglemos las resistencias N y M para que el amperímetro I registre la carga mínima I_0 y el voltímetro V indique la tensión normal. Para este estado de funcionamiento, el más favorable para la tensión de la dínamo, observaremos la corriente de excitación i_0 y puede augurarse que el reóstato R de la figura 17, deberá tener su palanca en el tope T (*toda resistencia*), cumpliéndose como antes la relación de Ohm.

$$d + R = \frac{V}{i_0}.$$

Restando miembro a miembro las dos últimas ecuaciones, se halla

$$R = \frac{V}{i_0} - \frac{V}{i_H}. \qquad [19]$$

Esta fórmula nos indica la resistencia total que debe tener el reóstato que tratamos de calcular.

Procedamos ahora como en el caso de carga variable y velocidad constante, hasta calcular el reóstato de hélices iguales, de valor común r.

Procedamos luego como en el caso de velocidad variable y carga constante, hasta calcular un reóstato de hélices iguales, de valor común r'.

Tomaremos para valor de las hélices componentes del reóstato que calculamos, un valor intermedio entre r y r', que llamaremos r'' y el número de hélices del reóstato será

$$H = \frac{R}{r''}. \qquad [20]$$

El diámetro de los hilos resistentes se calculará mediante las fórmulas conocidas (cap. II).

EJEMPLO. — *Calcular el reóstato de excitación para una dínamo shunt que debe producir constantemente una tensión de* 120 *voltios pudiendo variar su carga entre* 0 *y* 100 *amperios, y su velocidad de rotación entre* 900 *y* 1000 *revoluciones por minuto.*

Procedamos experimentalmente, midiendo la intensidad de la corriente de excitación, para los dos casos extremos de funcionamiento; suponiendo que para n_o e I_h se obtiene

$$i_H = 3 \text{ amperios},$$

y para n_h e I_o se obtiene

$$i_o = 2.$$

La resistencia total que debe tener el reóstato que estudiamos, viene dada por la fórmula [19] y será

$$R = \frac{120}{2} - \frac{120}{3} = 20 \text{ ohmios.}$$

En el ejemplo de la página 91, hemos estudiado el reóstato para esta máquina, suponiendo constante la velocidad y variable la carga, y hemos obtenido para valor medio de las resistencias componentes

$$r = 0'85 \,.$$

En el ejemplo de la página 100, hemos estudiado el reóstato para el caso de carga constante y velocidad variable y podemos fijar como valor medio de sus hélices

$$r' = 0'85 \,,$$

luego para el caso actual, de carga y velocidad variables, podremos tomar para valor común de sus hélices

$$r'' = 0'85 \,.$$

El reóstato que estudiamos deberá tener un número de hélices [20]

$$H = \frac{20}{0'85} = 23 \,.$$

CAPÍTULO V

REÓSTATOS PARA DÍNAMOS SERIE

Conexión del reóstato. — Una dínamo excitada en serie, debe tener su reóstato regulador de campo magnético, montado en derivación con el in-

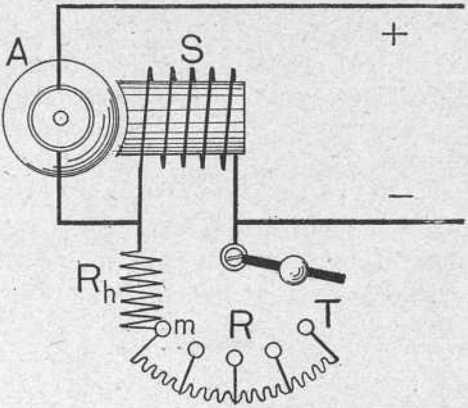

Fig. 19

ductor, según se representa en la figura 19. Si aumenta el gasto en el circuito exterior, aumentará la corriente de excitación a través de *S* y, con ella, la tensión de la dínamo. Entonces será preciso disminuir la corriente en S sin disminuir la total que sale a la línea, lo cual se consigue derivando parte de la corriente mediante el reóstato R montado en paralela con el inductor.

Si aumenta la velocidad de rotación de la dínamo subirá también la tensión, y sobrando corriente de excitación, deberemos derivar una parte de ella mediante el reóstato R.

Refiriéndonos a la indicación del voltímetro, podemos decir que *cuando la tensión baje, debe aumentarse la resistencia del reóstato, y cuando la tensión suba, debe disminuirse la resistencia.*

En el caso de dínamo shunt, el reóstato R (figura 17) podía estar *sin resistencia* (posición S), pero no podía estar más allá del tope T, es decir, en *reóstato abierto,* porque faltaría corriente de excitación.

En cambio, en el caso de dínamo serie, el reóstato R (fig. 19) puede tener su circuito abierto; pero no puede reducir su resistencia más allá de un mínimo (posición m), porque faltaría corriente de excitación.

Estudiaremos para estas máquinas los mismos casos de funcionamiento que para las excitadas en shunt.

Funcionamiento a velocidad constante y carga variable. — Cuando la dínamo ha de funcionar con carga variable, se calculan los inductores de manera que produzcan *la tensión normal para la carga mínima,* por lo tanto, cuando la máquina produce su mínimo amperaje el reóstato debe estar abierto, esto es, su palanca más allá del tope *T*.

Para calcular el reóstato que conviene a una dínamo dada, se necesitan previamente algunos datos que se determinan experimentalmente mediante el montaje indicado en la figura 20.

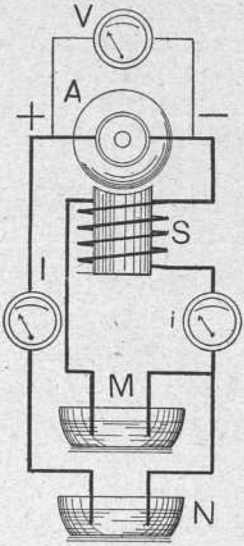

Fig. 20

Los terminales + — de la dínamo *A* se llevan a una resistencia líquida *N* de las empleadas en los talleres, intercalando en el circuito un amperímetro *I* que nos permita apreciar en cualquier momento la carga de la dínamo.

Entre los extremos del circuito de excitación *S*, se deriva un reóstato M. Otro amperímetro i nos medirá la corriente de excitación y el voltímetro V nos indicará la tensión en las escobillas.

Para operar, empezaremos por arreglar la resistencia N para que el amperímetro I marque la carga mínima que la dínamo debe producir. A la vez se arregla la resistencia M para que V nos marque la tensión normal.

Si los inductores están bien calculados, la resistencia M debe ser infinita en este momento, es decir, toda la corriente que la máquina produce debe circular por el inductor S, de manera que la corriente de excitación i_0 debe ser igual a la corriente de gasto I_0:

$$i_0 = I_0 .$$

Disminuyamos la resistencia N para que aumente el gasto y veremos subir la tensión marcada por el voltímetro V. Cuando la tensión llegue al máximo tolerado V', cerraremos el reóstato M, reduciendo su resistencia hasta conseguir que la tensión vuelva a ser la normal V, anotando entonces la corriente marcada por el amperímetro i. Sean en este momento I_1 el gasto de la máquina, i_1 la corriente de excitación, y R la resistencia total del reóstato M.

El inductor y el reóstato forman un polígono cerrado en el cual debe cumplirse la ley de Kirchoff (tomo I, pág. 105):

$$s\, i_1 - R\,(I_1 - i_1) = 0,$$

de donde

$$R = \frac{si_1}{I_1 - i_1}. \qquad [1]$$

Reduzcamos nuevamente la resistencia N para aumentar el gasto, hasta que la tensión suba otra vez a V'. Disminuyamos la resistencia M para que baje la tensión a la normal y anotemos también las indicaciones de los amperímetros I_2 del gasto e i_2 de la corriente de excitación. Si tuviéramos ya construído e instalado el reóstato R de la figura 19, en este nuevo estado de funcionamiento de la dínamo colocaríamos la palanca para que quedase fuera de circuito la primera hélice R_1.

Aplicando ahora la ley de Kirchoff al conjunto de inductor y reóstato deduciríamos:

$$R - R_1 = \frac{s\,i_2}{I_2 - i_2},$$

y restando esta ecuación de la [1]

$$R_1 = \frac{s\,i_1}{I_1 - i_1} - \frac{s\,i_2}{I_2 - i_2}, \qquad [2]$$

y del mismo modo obtendríamos

$$R_2 = \frac{s\,i_2}{I_2 - i_2} - \frac{s\,i_3}{I_3 - i_3}$$

$$\dots\dots\dots\dots\dots\dots \qquad [3]$$

$$R_h = \frac{s\,i_h}{I_h - i_h},$$

siendo I_h i_h el máximo gasto de la dínamo y la corriente de excitación correspondiente, y R_h la resistencia de la última hélice, que no puede suprimirse.

Los diámetros de los conductores resistentes se calcularán por las mismas fórmulas de siempre (pág. 54), teniendo en cuenta que por la primera hélice R_1 pasa una corriente máxima $I_1 - i_1$; por la R_2 pasa una corriente máxima $I_2 - i_2$ y así sucesivamente, hasta la última R_h por la cual ha de circular una corriente máxima $I_h - i_h$.

EJEMPLO. — *Calcular el reóstato para una dínamo serie que debe producir* 120 *voltios a la velocidad constante de* 1000 *revoluciones y una carga variable de* 10 *a* 100 *amperios.*

Efectuaremos la serie de experimentos que hemos explicado anteriormente, y supongamos que los amperímetros I e i nos dan las siguientes indicaciones:

$i_0=10 \quad i_1=10'2 \quad i_2=10'4 \quad i_3=10'6 \quad i_4=10'8$
$i_5=11 \quad i_6=11'2$

$I_0=10 \quad I_1=25 \quad I_2=40 \quad I_3=55 \quad I_4=70 \quad I_5=85$
$I_6=100.$

Siendo $s=2$ la resistencia del inductor, tendremos según las fórmulas [1], [2] y [3]:

$$R = \frac{2 \times 10'2}{25 - 10'2} = 1'38$$

$$R_1 = \frac{2 \times 10'2}{25 - 10'2} - \frac{2 \times 10'4}{40 - 10'4} = 0'68$$

$R_2=0'22 \quad R_3=0'11 \quad R_4=0'07 \quad R_5=0'05 \quad R_6=0'25.$

Como comprobación de cálculo, observemos que la suma de las hélices es igual a la resistencia total $R = 1'38$.

Los diámetros de los hilos resistentes los calcularemos para las intensidades

$$I_1 - i_1 = 14'8 \qquad I_2 - i_2 = 29'6 \qquad I_3 - i_3 = 44'4$$
$$I_4 - i_4 = 59'2 \qquad I_5 - i_5 = 74 \qquad I_6 - i_6 = 88'8$$

Siendo tan diferentes las intensidades, deberán calcularse los diámetros, distintos para cada una de las hélices. No es aceptable en este caso el cálculo abreviado que hemos indicado para las dínamos excitadas en derivación.

Tomando la fórmula

$$d = 0'035 \sqrt[3]{I^2},$$

tendremos para las seis hélices

$$d_1 = 0'035 \sqrt[3]{14'8^2} = 0'21 \text{ cm.}$$

$$d_2 = 0'035 \sqrt[3]{29'6^2} = 0'33 \text{ —}$$

$$d_3 = 0'035 \sqrt[3]{44'4^2} = 0'43 \text{ —}$$

$$d_4 = 0'035 \sqrt[3]{59'2^2} = 0'53 \text{ —}$$

$$d_5 = 0'035 \sqrt[3]{74^2} = 0'61 \text{ —}$$

$$d_6 = 0'035 \sqrt[3]{88'8^2} = 0'70 \text{ —}$$

A estos diámetros corresponden las siguientes secciones, expresadas en milímetros cuadrados:

$$s_1 = 3'46 \qquad s_2 = 8'55$$
$$s_3 = 14'52 \qquad s_4 = 22'06$$
$$s_5 = 29'22 \qquad s_6 = 38'48$$

Con estas secciones y con las resistencias que ya conocemos, calcularemos las longitudes de las hélices, mediante la fórmula

$$l = \frac{Rs}{\rho}.$$

Tendremos:

$$l_1 = \frac{0'68 \times 3'46}{0'3} = 7'85 \text{ m.}$$

$$l_2 = \frac{0'22 \times 8'55}{0'3} = 6'26 \text{ —}$$

$$l_3 = \frac{0'11 \times 14'52}{0'3} = 5'35 \text{ —}$$

$$l_4 = \frac{0'07 \times 22'06}{0'3} = 5'15 \text{ —}$$

$$l_5 = \frac{0'05 \times 29'22}{0'3} = 4'86 \text{ —}$$

$$l_6 = \frac{0'25 \times 38'48}{0'3} = 32'2 \text{ —}$$

Los topes del reóstato deberán calcularse teniendo en cuenta la mayor corriente que pasa por él, que en nuestro ejemplo numérico es 88'8 amperios. Fijando la densidad de corriente en 0'4 amperios por milímetro cuadrado, resulta una sección de

$$\frac{88'8}{0'4} = 222 \text{ mm.}^2$$

que corresponde a un diámetro de 17 mm.

Funcionamiento con carga constante y velocidad variable. — Cuando la máquina ha de funcionar con velocidad variable, se calculan los inductores de manera *que produzcan la tensión normal con la velocidad mínima*, por lo cual, en este estado de funcionamiento, el reóstato R (fig. 19) debe estar abierto y toda la corriente producida I será corriente inductora i_o

$$i_o = I .$$

Para calcular el reóstato que conviene a una dínamo dada procederemos primeramente a una serie de determinaciones experimentales, en todo análogas a las efectuadas para el caso de funcionamiento con carga variable, mediante el mismo montaje de la figura 20.

Puesta en marcha la dínamo A a la velocidad mínima n_o, arreglaremos los reóstatos M y N para conseguir que el voltímetro V marque la tensión normal y el amperímetro I la carga constante que debe tener la máquina.

Si los inductores están bien calculados, la resistencia M debe ser infinita en este momento, es decir,

$$i_o = I$$

según hemos dicho.

Aumentemos la velocidad de la dínamo hasta que la tensión V suba a V', máxima tolerada. En este momento, cerraremos el reóstato M, reduciendo su resistencia hasta que la tensión vuelva a ser la normal, y observaremos la corriente i_1 señalada por el amperímetro i.

El conjunto de los inductores y el reóstato deben cumplir la segunda ley de Kirchoff.

$$s\,i_1 - R\,(I - i_1) = o,$$

de donde

$$R = \frac{s\,i_1}{I - i_1}. \qquad [4]$$

Esta fórmula nos dará la resistencia que debe tener el reóstato.

Aumentemos nuevamente la velocidad hasta que la tensión suba al máximo, y disminuyamos luego la resistencia M para que la tensión vuelva a su valor normal. Sea i_2 la corriente de excitación en este momento.

Si tuviéramos ya construído e instalado el reóstato R de la figura 19, en este estado de funcionamiento de la máquina, suprimiríamos la primera hélice R_1. Aplicando ahora la ley de Kirchoff al polígono cerrado por los inductores y el reóstato, tendríamos

$$R - R_1 = \frac{s\, i_2}{I - i_2},$$

y restando esta ecuación de la [4]

$$R_1 = \frac{s\, i_1}{I - i_1} - \frac{s\, i_2}{I - i_2}. \qquad [5]$$

Del mismo modo obtendríamos

$$R_2 = \frac{s\, i_2}{I - i_2} - \frac{s\, i_3}{I - i_3}$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \qquad [6]$$

$$R_h = \frac{s\, i_h}{I - i_h}.$$

siendo i_h la corriente de excitación que corresponde a la velocidad máxima de la dínamo, y R_h la resistencia de la última hélice, que no puede nunca suprimirse.

Los diámetros de los hilos resistentes se calcularán por las mismas fórmulas de siempre (cap. II), teniendo en cuenta que por la primera hélice del reóstato, circula una corriente máxima $I - i_1$; por la segunda, $I - i_2$ y así sucesivamente hasta la última hélice R_h, por la cual circula una corriente máxima $I - i_h$.

EJEMPLO. — *Calcular el reóstato de excitación para una dínamo serie, que debe producir constante-*

mente 100 *amperios á* 120 *voltios, pudiendo variar su velocidad entre* 900 *y* 1000 *revoluciones por minuto.*

Efectuemos la serie de experimentos que hemos explicado anteriormente y supongamos que el amperímetro i nos da las siguientes indicaciones:

$$i_0 = 100 \qquad i_1 = 85 \qquad i_2 = 70 \qquad i_3 = 55$$
$$i_4 = 40 \qquad i_5 = 25 \qquad i_6 = 10$$

Siendo s la resistencia de los inductores, tendremos, según las fórmulas [4], [5] y [6]:

$$R = \frac{2 \times 85}{15} = 11'33$$

$$R_1 = \frac{2 \times 85}{15} - \frac{2 \times 70}{30} = 6'66$$

$$R_2 = \frac{2 \times 70}{30} - \frac{2 \times 55}{45} = 2'22$$

$$R_3 = \frac{2 \times 55}{45} - \frac{2 \times 40}{60} = 1'11$$

$$R_4 = \frac{2 \times 40}{60} - \frac{2 \times 25}{75} = 0'67$$

$$R_5 = \frac{2 \times 25}{75} - \frac{2 \times 10}{90} = 0'44$$

$$R_6 = \frac{2 \times 10}{90} = 0'22\,.$$

Como comprobación del cálculo, observemos que la suma de las hélices componentes es igual a la resistencia total.

Los diámetros de los hilos resistentes se calcularán para las intensidades:

$$I - i_1 = 15 \quad I - i_2 = 30 \quad I - i_3 = 45$$
$$I - i_4 = 60 \quad I - i_5 = 75 \quad I - i_6 = 90 \,,$$

y los topes de contacto deberán ser todos para 90 amperios.

Funcionamiento con carga y velocidad variables. Supongamos que una dínamo debe funcionar con una carga variable entre I_o e I_h amperios, marchando a velocidad también variable entre n_o y n .

Al construir la dínamo, se calculan los inductores para *que produzcan la tensión normal marchando la máquina a la velocidad mínima* n_o *y con la carga mínima* I_o. Entonces se emplea para la excitación toda la corriente producida, de manera que

$$i_o = I_o \,,$$

y el reóstato R de la figura 19, debe mantener abierto su circuito.

En cuanto aumente la velocidad o aumente la carga, sobrará corriente de excitación y deberemos derivar por el reóstato parte de la corriente producida por la máquina, para que la corriente de excitación sea menor que la corriente producida.

Si damos a la dínamo su máxima velocidad n_h y la hacemos producir su máxima carga I_h, tendremos que reducir al mínimo la resistencia del reóstato Llamando R_h a esta resistencia y aplicando la segunda ley de Kirchoff al polígono cerrado de inductores y reóstato, tendremos:

$$R_h\,(I_h - i_h) - s\,i_h = 0\,,$$

de donde

$$R_h = \frac{s\,i_h}{I_h - i_h}\,, \qquad [7]$$

fórmula que nos dará a conocer la resistencia de la última hélice.

Calculemos, como en el primer caso de este capítulo, el reóstato que convendría para regular la tensión, cuando variase la carga sin variar la velocidad. Calculemos, como en el segundo caso, el reóstato que convendría para regular la tensión, cuando la máquina marchase con carga constante y velocidad variable. Tomaremos para resistencia de nuestro reóstato actual, el mayor de los dos valores hallados y para valor de las hélices componentes el menor de los valores hallados para las hélices componentes en los dos problemas.

EJEMPLO. — *Calcular el reóstato para una dínamo serie que debe producir* 120 *voltios con una carga variable de* 10 *a* 100 *amperios y una velocidad variable de* 900 *a* 1000 *revoluciones por minuto.*

Procedamos primero experimentalmente determinando la corriente de excitación i_h que corresponde al funcionamiento con carga máxima y velocidad máxima, y supongamos que hallamos

$$i_h = 11'2$$

Siendo $s = 2$ la resistencia de los inductores, la fórmula [7] nos dará la mínima resistencia del reóstato:

$$R_h = \frac{2 \times 11'2}{100 - 11'2} = 0'25 .$$

El cálculo del reóstato, suponiendo constante la velocidad, está hecho en el ejemplo de la página 111, y nos dió:

$$R = 1'38 \quad R_1 = 0'68 \quad R_2 = 0'22 \quad R_3 = 0'11$$
$$R_4 = 0'07 \quad R_5 = 0'05 \quad R_6 = 0'25$$

El cálculo del reóstato, suponiendo constante la carga, está hecho en el ejemplo de la página 117, y nos dió:

$$R = 11'33 \quad R_1 = 6'66 \quad R_2 = 2'22 \quad R_3 = 1'11$$
$$R_4 = 0'67 \quad R_5 = 0'44 \quad R_6 = 0'22 .$$

En vista de este resultado, tomaremos como resistencia total

$$R = 11'33 ,$$

y teniendo en cuenta que la resistencia última, la que no puede suprimirse, es

$$R_h = 0'25 ,$$

la parte variable será

$$R - R_h = 11'08$$

Fijemos las hélices componentes en 0'1 todas ellas, y el número de hélices será:

$$h = \frac{11'08}{0'1} = 111 .$$

CAPÍTULO VI

Reóstatos para motores shunt

Objetos. — Un motor de corriente continua excitado en derivación o shunt, se une a la red de alimentación como indica el esquema de la figura 21.

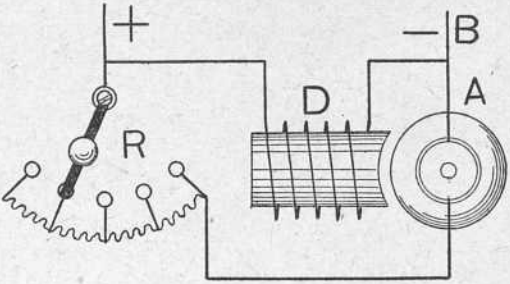

Fig. 21

La entrada del inductor *D* y del inducido *A* comunican con un polo de la línea mediante dos hilos independientes, y la salida común de ambos órganos comunica con el segundo polo mediante un hilo único *B*.

Siendo *V* el voltaje de la red; *e* la fuerza contraelectromotriz desarrollada por la rotación del inducido y r la resistencia de ésta, la corriente que circula por el inducido viene dada por la fórmula

$$i = \frac{V - e}{r}.$$

Al cerrar el interruptor, teniendo el motor parado, la fuerza contraelectromotriz de su inducido es nula, y, por lo tanto, la corriente alcanza un valor máximo

$$I = \frac{V}{r},$$

que puede ser peligroso para sus devanados. Para evitar este peligro, se protege el inducido mediante un reóstato R, puesto en serie con él, y cuya resistencia deberá ser grande en el momento de cerrar el interruptor; ir decreciendo a medida que aumente la velocidad del rótor, y quedar anulada cuando se alcance la plena marcha del motor.

Estos reóstatos, empleados para la arrancada de los motores, se llaman *reóstatos de arranque.*

Con otro objeto pueden emplearse reóstatos en la instalación de un motor.

Un motor con N conductores en su inducido y $\mathcal{N}$ maxvelios en su campo inductor, gira con un número de revoluciones por segundo

$$n = \frac{V - r\,i}{N\,\mathcal{N}}$$

Esta velocidad puede disminuirse mediante el mismo reóstato de arranque, ya que esta resistencia, puesta en serie con el inducido, rebaja el voltaje *V* a que se halla sometido, es decir, disminuye el numerador de la fórmula última.

La velocidad puede aumentarse, disminuyendo el denominador, es decir, disminuyendo el flujo inductor *N*. Para ello, se monta una resistencia, en serie con el inductor, con objeto de reducir la corriente de excitación.

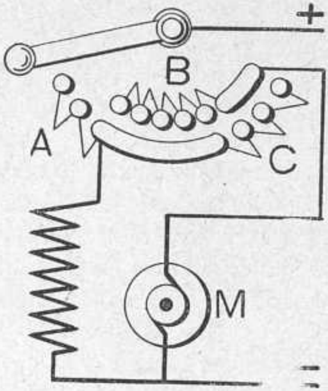

Fig. 22

Estos reóstatos se llaman *reguladores de velocidad*.

La figura 22 indica una disposición que puede emplearse para la arrancada y para regular la velocidad en ambos sentidos.

Los topes *B* sirven para intercalar resistencias en serie con el inducido, bien durante la arrancada o bien cuando se quiere reducir la velocidad. Los topes C se ponen en serie con el inductor, disminuyendo el flujo y aumentando la velocidad.

Estudiaremos los reóstatos de arranque y los de regulación para motores shunt y motores serie, suponiendo siempre que la distribución se hace a tensión constante y corriente variable, que es el procedimiento generalmente empleado.

Reóstato de arranque. — El arranque de los motores shunt, debe efectuarse sin que la corriente que atraviesa el inducido exceda de un máximo tolerado.

Sea i la corriente normal e I el máximo que puede tolerarse.

Al cerrar el interruptor, el motor está parado, no tiene fuerza contraelectromotriz que oponer al voltaje que llega, y es atravesado por la intensidad que corresponde a su resistencia óhmica, según la ley de Ohm

$$\frac{V}{r},$$

esta intensidad es evidentemente peligrosa para los devanados y hemos de defender el motor mediante una resistencia R que limite la intensidad al máximo tolerado I. Tendremos:

$$I = \frac{V}{R + r},$$

de donde se deduce

$$R = \frac{V}{I} - r, \qquad [1]$$

que será la resistencia total del reóstato.

Arranca el motor y en cuanto rueda, da lugar a una fuerza contraelectromotriz con la cual se opone al voltaje que llega.

La resistencia R, puesta en serie con el motor, obra como reóstato reductor de velocidad y solamente permite una velocidad de rotación muy inferior a la normal. Sea e' la fuerza contraelectromotriz que corresponde a esta velocidad y cuando el motor la alcance, se reducirá la intensidad a la normal i; de manera que

$$i = \frac{V - e'}{R + r}.$$

En este momento, suprimimos del reóstato su primera hélice R_1 y la intensidad sube nuevamente al máximo tolerado I

$$I = \frac{V - e'}{R + r - R_1}.$$

Dividiendo, miembro a miembro, las dos fórmulas últimas

$$\frac{i}{I} = \frac{R + r - R_1}{R + r} = 1 - \frac{R_1}{R + r},$$

de donde se deduce

$$R_1 = \left(1 - \frac{i}{I}\right)(R + r), \qquad [2]$$

que será la resistencia de la primera hélice.

Rueda el motor ganando velocidad, hasta alcanzar la que le permite el reóstato que tiene puesto en serie y obtiene a la vez una fuerza contraelectromotriz e'' que limita la tensión y reduce la intensidad a la normal i; de manera que

$$i = \frac{V - e''}{R + r - R_1}.$$

En este momento, suprimimos del reóstato su segunda hélice R_2 y la intensidad sube nuevamente al máximo tolerado I.

$$I = \frac{V - e''}{R + r - R_1 - R_2}.$$

Dividiendo miembro a miembro las dos últimas fórmulas

$$\frac{i}{I} = \frac{R + r - R_1 - R_2}{R + r - R_1} = 1 - \frac{R_2}{R + r - R_1},$$

de donde

$$R_2 = \left(1 - \frac{i}{I}\right)(R + r - R_1), \qquad [3]$$

que se transforma fácilmente en

$$R_2 = \left(1 - \frac{i}{I}\right)(R + r) - \left(1 - \frac{i}{I}\right) R_1.$$

Observemos que los dos primeros paréntesis del segundo miembro forman exactamente el valor R_1 según la ecuación [2], luego puede ponerse

$$R_2 = R_1 - \left(1 - \frac{i}{I}\right) R_1 = \frac{i}{I} R_1. \qquad [4]$$

Los razonamientos y cálculos empleados para deducir esta fórmula los repetiríamos para todas las demás hélices del reóstato, deduciendo la sencilla regla siguiente: *Una hélice cualquiera es igual a la anterior multiplicada por la constante* $\frac{i}{I}$.

Como se ve, es muy sencillo el cálculo del reóstato de arranque para un motor shunt. Conocida la intensidad normal i, se fija la intensidad máxima I que puede tolerarse. Por la fórmula [1] se calcula la resistencia total del reóstato. Por la fórmula [2] se calcula la primera hélice y por la regla deducida de la fórmula [4] se van calculando hélices hasta que la suma de sus resistencias sea igual a la resistencia total.

Cálculo gráfico de las hélices. — Las fórmulas [2] y [3] nos dan un método gráfico para determinar las resistencias componentes del reóstato.

Adoptada una unidad para los ohmios y otra para los amperios, fijemos las intensidades extremas toleradas (fig. 23)

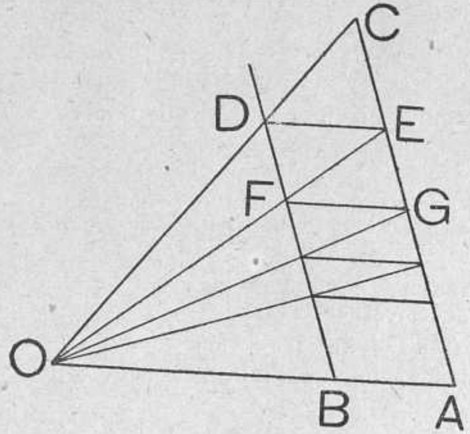

Fig. 23

$$I = OA \qquad i = OB,$$

y por lo tanto

$$AB = I - i.$$

Fijemos también

$$AC = R + r.$$

y tracemos por B una paralela a CA.

Uniendo O con C y trazando DE, paralela a OA, se forman dos triángulos semejantes CDE y COA que nos dan:

$$\frac{CE}{CA} = \frac{DE}{OA}$$

de donde

$$CE = DE \frac{CA}{OA} = \frac{(I - i)(R + r)}{I} =$$

$$\left(1 - \frac{i}{I}\right)(R + r),$$

que, según la fórmula [2], puede ponerse

$$CE = R_1 . .$$

Del mismo modo, uniendo O con E y trazando FG, tendremos:

$$FG = R_2 ,$$

y así sucesivamente.

Los resultados que se obtienen son independientes de la inclinación dada a la recta AC.

Cálculo de conductores. — Teniendo en cuenta que se trata de reóstatos de arranque y que sus hélices van a estar en circuito durante muy corto tiempo, calcularemos las secciones de los hilos resistentes mediante la fórmula establecida en el capítulo II (pág. 57).

$$s = a I \sqrt{\frac{\Theta}{t_2 - t_1}} \text{ mm.}^2 ,$$

en la cual $t_2 - t_1$ es la elevación de temperatura sobre la del ambiente, y Θ es el tiempo que está en circuito la hélice que calculamos.

Cálculo de los topes de contacto. — Los topes de contacto para el reóstato se calcularán todos ellos para la intensidad I; pero puede fijarse una densidad de corriente algo mayor que en los reguladores de tensión para dínamos, teniendo en cuenta que los topes del reóstato de arranque de un motor, van a estar en circuito muy poco tiempo, y, por lo tanto, aun cuando se calienten algo, no podrán nunca alcanzar temperaturas peligrosas.

El arranque de un motor dura, a lo más, treinta o cuarenta segundos.

Puede admitirse para los reóstatos de arranque una densidad de corriente cuádruple de la admitida en el caso de reguladores.

Generalmente se fija entre 0'8 y 1'6 amperios por milímetro cuadrado.

EJEMPLO. — *Calcular el reóstato de arranque para un motor shunt que funciona a 250 voltios y consume 12'5 amperios en plena marcha. El inducido tiene 0'5 ohmios de resistencia. Durante la arrancada puede tolerarse una corriente de 25 amperios, es decir, doble de la normal.*

La resistencia total del reóstato será según la fórmula [1]:

$$R = \frac{250}{25} - 0'5 = 9'5 \text{ ohmios.}$$

La primera hélice, según la fórmula [2]:

$$R_1 = \left(1 - \frac{12'5}{25}\right)(9'5 + 0'5) = 5\,,$$

y las demás hélices, calculadas según la regla de la fórmula [4]:

$$R_2 = 0'5 \times 5 = 2'5$$

$$R_3 = 1'25 \qquad R_4 = 0'62 \qquad R_5 = 0'31$$

cuya suma será 9'68 ohmios.

Para calcular las secciones de los conductores resistentes, admitamos que se van a hacer de mélchior, consintiendo una elevación de temperatura sobre el ambiente de 150 grados y siendo 25 amperios la máxima corriente que va a circular por ellos.

La fórmula conocida (pág. 57) nos dará:

$$s = 0'3 \times 25 \sqrt{\frac{\Theta}{150}} = 0'6 \sqrt{\Theta} \text{ mm.}^2$$

Supongamos que sobre cada tope del reóstato va a detenerse la palanca seis segundos y tendremos las secciones siguientes:

$$s_1 = 0'6 \sqrt{6} = 1'47 \text{ mm.}^2$$
$$s_2 = 0'6 \sqrt{12} = 2'17 \quad —$$
$$s_3 = 0'6 \sqrt{18} = 2'54 \quad —$$
$$s_4 = 0'6 \sqrt{24} = 2'94 \quad —$$
$$s_5 = 0'6 \sqrt{30} = 3'28 \quad —$$

que corresponden a los diámetros.

$$d_1 = 0'43 \quad d_2 = 0'52 \quad d_3 = 0'57 \quad d_4 = 0'61 \quad d_5 = 0'64$$

Las longitudes se calculan como siempre, mediante la fórmula

$$l = \frac{Rs}{\rho},$$

que tomando $\rho = 0'3$ nos da:

$$l_1 = \frac{5 \times 1'47}{0'3} = 24'5 \text{ m.}$$

$$l_2 = \frac{2'5 \times 2'17}{0'3} = 18 \quad -$$

$$l_3 = \frac{1'25 \times 2'54}{0'3} = 16 \quad -$$

$$l_4 = \frac{0'62 \times 2'94}{0'3} = 6'5 \quad -$$

$$l_5 = \frac{0'31 \times 3'28}{0'3} = 3'5 \quad -$$

Para calcular los topes de contacto del reóstato, fijemos la densidad de corriente en 0'5 amperios por milímetro cuadrado y recordando que la mayor intensidad va a ser de 25 amperios, obtendremos una sección

$$s = \frac{25}{0'5} = 50 \text{mm.}^2$$

que corresponde a un diámetro de 8 milímetros.

Queda completamente calculado el reóstato.

Intensidad máxima con un reóstato dado. — En la práctica puede presentarse el caso de aprovechar para un motor el reóstato construído para otro, y antes de aceptarlo, podremos calcular la intensidad máxima que va a circular por el motor, o bien, la relación entre las intensidades normal y máxima durante el arranque.

$$\frac{i}{I}.$$

Recordemos para ello la regla dada al calcular las resistencias componentes, como consecuencia de la fórmula [4], y es evidente que todas estas resistencias componentes forman una progresión geométrica de razón $\frac{i}{I}$.

La conocida fórmula de la suma de los h primeros términos de una progresión decreciente, nos dará:

$$R = R_1 \frac{1-\left(\frac{i}{I}\right)^h}{1-\left(\frac{i}{I}\right)}.$$

Recordando el valor [2]

$$R_1 = (R+r)\left(1-\frac{i}{I}\right),$$

y multiplicando miembro a miembro estas igualdades

$$R = R + r)\left(1-\left(\frac{i}{I}\right)^h\right),$$

de donde se deduce

$$\frac{i}{I} = \sqrt[h]{\frac{r}{R+r}}. \qquad [5]$$

EJEMPLO. — *Para un motor que consume 25 amperios en marcha normal, y cuyo inducido tiene 0'5 ohmios, se desea aprovechar un reóstato de 40 ohmios formado por 4 hélices. ¿Cuál será la intensidad máxima que atravesará el motor durante el arranque?*

Aplicando la fórmula última, se tiene

$$\frac{i}{I} = \sqrt[4]{\frac{0'5}{40 + 0'5}} = \sqrt[4]{\frac{1}{81}} = \frac{1}{3}$$

de donde se deduce

$$\frac{i}{I} = \frac{1}{3} \quad \text{ó} \quad I = 3\,i,$$

y recordando que $i = 25$ se tiene

$$I = 3 \times 25 = 75 \,.$$

Reóstato para reducir la marcha. — La intensidad de corriente que circula por un motor viene dada por

$$i = \frac{V - e}{r}.$$

La fuerza contraelectromotriz e, es proporcional a la velocidad de rotación n, luego puede ponerse

$$i = \frac{V - kn}{r}. \qquad [6]$$

Si queremos que la velocidad descienda de n a n', es preciso poner en serie con el inducido, una resistencia R_1 que con la intensidad i produzca una caída de tensión $kn - kn'$, es decir, que debe cumplir la condición

$$kn - kn' = R_1 i,$$

de donde

$$R_1 = \frac{k}{i}(n - n'). \qquad [7]$$

Si queremos que la velocidad descienda de n' a n'', será preciso poner en serie con el inducido, una resistencia R_2 que con la intensidad i produzca una caída de tensión $kn' - kn''$, es decir, que debe cumplir la condición

$$kn' - kn'' = R_2 i,$$

de donde

$$R_2 = \frac{k}{i}(n' - n''), \qquad [8]$$

y análogamente las demás hélices.

Para la aplicación de estas fíórmulas es preciso conocer k, y esto puede conseguirse experimentalmente. De la fórmula [6] se deduce

$$k = \frac{V - ri}{n} = \frac{e}{n}, \qquad [9]$$

luego bastará conocer el voltaje de alimentación V y la resistencia r, midiendo experimentalmente i y n.

Los conductores resistentes se calcularán como reguladores, mediante las fórmulas de la página 54, y serán todos de la misma sección, pues todos deben ser recorridos por la misma intensidad.

Los topes resistentes se calcularán, como siempre, por densidad de corriente, asignando a ésta los valores fijados para el caso de reguladores.

Cálculo gráfico. — Las fórmulas [7], [8] y sus análogas para la determinación de las resistencias componentes, pueden escribirse así:

$$\frac{k}{i} = \frac{R_1}{n - n'} = \frac{R_2}{n' - n''} = \ldots$$

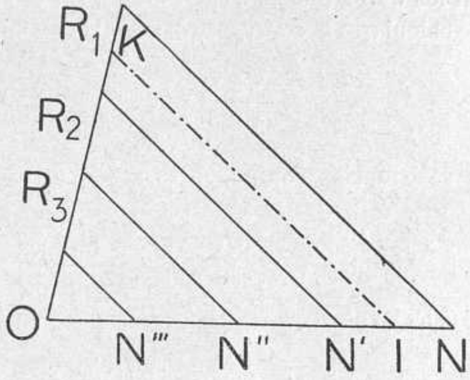

Fig. 24

permitiendo un sencillo cálculo gráfico. Tomemos (fig. 24) las magnitudes

$$OK = k \qquad OI = i$$

en los lados de un ángulo cualquiera.

Tomemos también las magnitudes

$$O\,N = n \qquad O\,N' = n' \qquad O\,N'' = n'' \ldots$$

y trazando paralelas a la dirección $K\,I$, determinaremos en el otro lado del ángulo los segmentos $R_1\ R_2\ R_3$ ..., que son las resistencias buscadas.

Ejemplo 1.º — *Calcular un reóstato reductor de velocidad, para un motor shunt que funciona a 220 voltios, consume 30 amperios y tiene 1 ohmio de resistencia en su inducido. Su velocidad, que es de 600 revoluciones por minuto (10 por segundo) se desea reducir a 9'5, 9 y 8'5 por segundo.*

Con los datos que se tienen de la plena marcha, puede calcularse la constante k, según la fórmula [9]

$$k = \frac{220 - 1 \times 30}{10} = 19\,,$$

y las resistencias componentes serán [7]:

$$R_1 = \frac{19}{30}\,(10 - 9'5) = 0'316 \text{ ohmios}$$

$$R_2 = 0'316 \qquad\qquad R_3 = 0'316$$

Ejemplo 2.º — *Un motor shunt que funciona a 250 voltios y consume 12'5 amperios en marcha normal, tiene un reóstato de arranque compuesto de cinco hélices:*

$$R_1 = 5 \qquad R_2 = 2'5 \qquad R_3 = 1'25$$
$$R_4 = 0'62 \qquad R_5 = 0'31.$$

Su velocidad normal es de 720 revoluciones por minuto (12 por segundo) y se desea saber cómo se reduce, dejando en circuito R_5 o dejando $R_5 + R_4$ o $R_5 + R_4 + R_3$. El inducido tiene 0'5 ohmios de resistencia.

Tenemos datos suficientes para calcular la constante k según la fórmula [9]:

$$k = \frac{250 - 0'5 \times 12'5}{12} = 20'31 .$$

Las fórmulas [7] y [8] ... nos darán

$$n' = n - \frac{R_1}{k} i \qquad n'' = n' - \frac{R_2}{k} i \quad \ldots$$

que, con los valores numéricos del ejemplo, serán:

$$n' = 12 - \frac{0'31}{20'31} 12'5 = 11'81$$

$$n'' = 11'81 - \frac{0'62 \times 12'5}{20'31} = 11'43$$

$$n''' = 11'43 - \frac{1'25 \times 12'5}{20'31} = 10'67$$

De manera que el número de revoluciones por minuto, se reduce a 708, 685 y 640.

Reóstato para acelerar la marcha. — La corriente gastada por el motor

$$i = \frac{V - e}{r}$$

debe ser siempre la misma, cualquiera que sea la velocidad de rotación, lo cual obliga a que sea constante la fuerza contraelectromotriz e.

Esta fuerza contraelectromotriz es proporcional a la velocidad n y a la corriente de excitación i_o, luego

$$e = kn\, i_o = kn \frac{V}{d} = k\, V \frac{n}{d}$$

siendo d la resistencia del inductor en derivación, luego si la velocidad se ha de elevar a $n_1\ n_2\ n_3 \ldots$, poniendo en serie con el inductor las resistencias $R_1\ R_2\ R_3 \ldots$, deberán cumplirse las condiciones

$$\frac{n}{d} = \frac{n_1}{d + R_1} = \frac{n_2}{d + R_1 + R_2} = \frac{n_3}{d + R_1 + R_2 + R_3} = \ldots$$

Restando cada fracción, término a término, de la siguiente, se obtiene

$$\frac{n}{d} = \frac{n_1 - n}{R_1} = \frac{n_2 - n_1}{R_2} = \frac{n_4 - n_2}{R_4} = \ldots \quad [10]$$

de donde se deducen las fórmulas

$$R_1 = \frac{d}{n}(n_1 - n) \qquad\qquad R_2 = \frac{d}{n}(n_2 - n_1)$$

$$R_3 = \frac{d}{n}(n_3 - n_2) \ldots$$

Las intensidades máximas que circularán por cada una de estas hélices serán

$$i_1 = \frac{V}{d+R_1} \quad i_2 = \frac{V}{d+R_1+R_2} \quad i_3 = \frac{V}{d+R_1+R_2+R_3} \ldots$$

y los topes de contacto deberán calcularse todos ellos para la intensidad

$$i_o = \frac{V}{d}.$$

Cálculo gráfico. — La serie de razones [10] permite un cálculo gráfico sencillo.

Sobre los lados de un ángulo cualquiera (fig. 25) se toman las magnitudes

$$O\,N = n \qquad O\,D = d$$

para determinar la dirección $N\,D$.

Se toman luego las magnitudes

$$O\,N_1 = n_1 \qquad O\,N_2 = n_2 \ldots$$

y las paralelas a la dirección $N\,D$ determinarán en el otro lado los segmentos R_1 R_2 $R_3 \ldots$

Ejemplo. — *Calcular las resistencias para acelerar la marcha de un motor que funciona a 220 voltios y tiene su inductor con una resistencia de 22 ohmios, para qué su velocidad de 11 vueltas por segundo, suba a 12, 13 y 14 vueltas.*

Las resistencias componentes serán

$$R_1 = \frac{22}{11}(12 - 11) = 2 \text{ ohmios}.$$

$$R_2 = 2 \qquad R_3 = 2\,.$$

Las intensidades máximas que circularán por estas hélices serán:

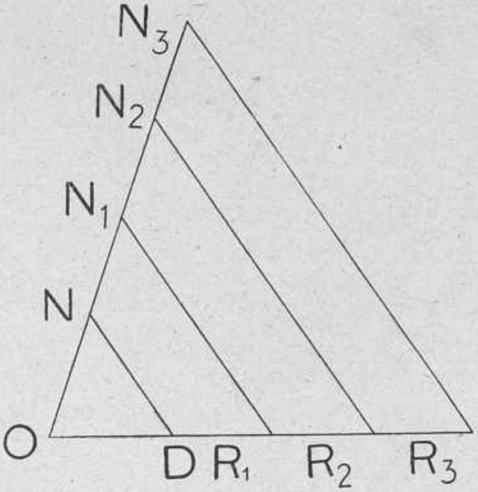

Fig. 25

$$i_1 = \frac{220}{22+2} = 9'16 \qquad i_2 = \frac{220}{26} = 8'46$$

$$i_3 = \frac{220}{28} = 8'06$$

y los topes de contacto se calcularán para la intensidad

$$i_o = \frac{220}{22} = 10.$$

CAPÍTULO VII

Reóstatos para motores serie

Objetos. — Un motor de corriente continua excitado en serie se une a la red de alimentación, según indica el esquema de la figura 26.

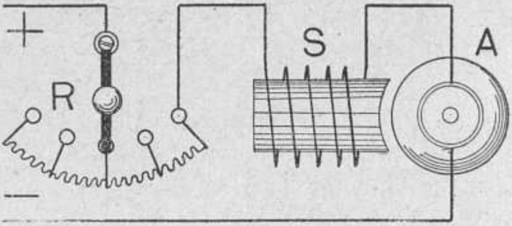

Fig. 26

El reóstato *R*, el inductor *S* y el inducido *A*, se reunen formando una serie que debe recorrer la corriente de alimentación.

Siendo *V* el voltaje de alimentación; *e* la fuerza contraelectromotriz desarrollada por la rotación del inducido; *r* y *s* las resistencias del inducido y excitación en serie, la corriente que atraviesa el motor está expresada por la fórmula

$$i = \frac{V - e}{s + r}.$$

Al cerrar el interruptor teniendo el motor parado, la fuerza contraelectromotriz de su inducido es nula y, por lo tanto, la corriente alcanza su valor máximo

$$I = \frac{V}{r + s},$$

que puede ser peligroso para sus devanados. Para evitar este peligro, se protege el inducido mediante un reóstato *R*, puesto en serie con el motor, y cuya resistencia deberá ser grande en el momento de cerrar el interruptor; ir decreciendo a medida que aumente la velocidad del inducido, y quedar anulada cuando se alcance la plena marcha del motor.

Este es el *reóstato de arranque.*

Otro objeto pueden cumplir los reóstatos en la instalación de motores serie.

La velocidad de un motor viene expresada por

$$n = \frac{V - ri}{N \mathcal{N}}.$$

Puede reducirse esta velocidad rebajando el voltaje mediante una resistencia puesta en serie con el motor, es decir, con el mismo reóstato de arranque.

Puede aumentarse la velocidad disminuyendo el denominador, es decir, disminuyendo el flujo inductor $\mathcal{N}$, para lo cual se monta una resistencia en derivación con el inductor.

Estos son los reóstatos *reguladores de velocidad.*

La figura 27 indica una disposición que puede emplearse para el arranque y para la regulación en ambos sentidos.

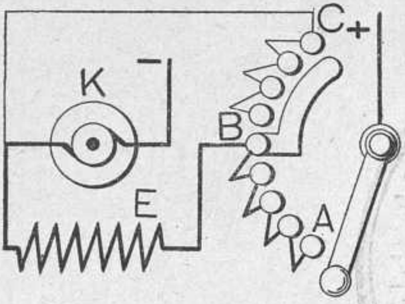

Fig. 27

Los topes de *A* a *B* sirven para intercalar resistencias en serie, bien durante la arrancada o bien cuando se quiera reducir la velocidad. Los topes *B* a *C*, sirven para shuntar el inductor, disminuyendo el flujo y aumentando la velocidad.

La figura 28 indica otra disposición para poner en marcha, regular la velocidad e invertir el sentido de rotación.

Cuando la palanca ocupa la posición 0,0, la corriente que llega por *A A'* no puede invadir el inducido porque los topes 0 y 1 son independientes entre sí.

Si la palanca se apoya sucesivamente en los topes 1, 2, 3, 4, la corriente invade el motor a través de resistencias, que decrecen hasta desaparecer.

Para invertir la marcha, giraremos lentamente la palanca del reóstato en sentido contrario, con lo cual vuelven a introducirse resistencias cada vez mayores, hasta cortar la corriente en la posición o,o.

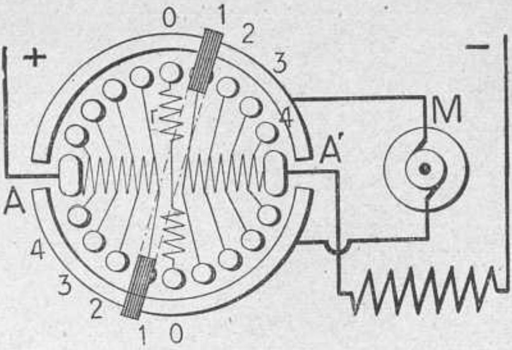

Fig. 28

El motor, aun cuando no tenga corriente, seguirá girando por la inercia de sus partes movibles, y si cerramos su circuito inducido a través de una resistencia *r*, mediante la posición o,o de la palanca se desarrollarán corrientes inducidas que según la ley de Lenz, nos servirán de freno para detener el motor antes de invertir su marcha. Si continuamos girando la palanca, todo sucederá como antes, pero invertida la corriente en el inducido, se invertirá el sentido de rotación del motor.

Reóstato de arranque. — El motor serie está indicado siempre que se desee un arranque con mayor energía que durante la marcha normal. Tal sucede, por ejemplo, en los motores para tranvías, a los cuales se les exige un esfuerzo en el momento de arranque que sea doble o triple que el de marcha normal.

Calcularemos el reóstato con la condición de que al cerrar el circuito, o suprimir resistencias, la corriente no pase de un máximo I_o.

En el momento de arranque no hay fuerza contraelectromotriz y deberemos poner en serie con el motor toda la resistencia R del reóstato. De manera que

$$I_o = \frac{V}{R + r + s},$$

de donde

$$R = \frac{V}{I_o} - r - s, \qquad [1]$$

que será la resistencia total del reóstato.

Arranca el motor, y en cuanto rueda, crea una fuerza contraelectromotriz e', que se opone al voltaje de alimentación y reduce la corriente hasta la normal

$$I = \frac{V - e'}{R + r + s}.$$

En este momento suprimimos la primera hélice R_1 del reóstato, y, mientras el motor no gane fuerza contraelectromotriz, la corriente se eleva al máximo tolerado

$$I_o = \frac{V - e'}{R + r + s - R_1}.$$

Dividiendo una por otra las dos últimas fórmulas

$$\frac{I}{I_o} = \frac{R + r + s - R_1}{R + r + s} = 1 - \frac{R_1}{R + r + s}$$

de donde se deduce

$$R_1 = \left(1 - \frac{I}{I_o}\right)(R + r + s)\,. \qquad [2]$$

Comparando las fórmulas [1] y [2] con las [1] y [2] del capítulo anterior se ve completa analogía entre ellas, por lo tanto, podemos aceptar, como allí, que *una hélice cualquiera es igual a la anterior multiplicada por la constante* $\frac{I}{I_o}$.

Calcularemos por la fórmula [1] la resistencia total del reóstato; por la [2], la primera hélice, y por la regla anterior todas las demás, hasta que la suma de resistencias componentes sea igual a la resistencia total del reóstato.

El cálculo gráfico, podrá hacerse como en la figura 23, siendo

$$OA = I_o \quad OB = I \quad AB = I_o - I \quad AC = R + r + s$$

se obtendrá

$$CE = R_1 \qquad EG = R_2 \ldots$$

Los diámetros de los hilos resistentes y las secciones de los topes de contacto, se calcularán todos para I_o amperios.

EJEMPLO. — *Calcular el reóstato de arranque para un motor serie, que funciona a* 600 *voltios y consume* 80 *amperios, siendo sus resistencias interiores* $r = 0'5$ $s = 0'5$ *ohmios, y permitiendo que durante el arranque, llegue la intensidad a* 100 *amperios.*

La resistencia total será [1]:

$$R = \frac{600}{100} - 1 = 5\,.$$

La primera hélice [2]

$$R_1 = \left(1 - \frac{80}{100}\right)(5 + 1) = 1'2$$

la segunda y siguientes:

$$R_2 = R_1 \frac{I}{I_o} = 0'96 \qquad R_3 = 0'81$$

$$R_4 = 0'65 \qquad R_5 = 0'52 \qquad R_6 = 0'42 \qquad R_7 = 0'34$$

Los conductores resistentes y topes de contacto se calculan para 100 amperios.

Reóstato para reducir la velocidad. — La intensidad de corriente gastada por el motor, viene dada por la fórmula

$$I = \frac{V - e}{r + s}.$$

Si regulamos la velocidad con la condición de conservar constante la intensidad, la fuerza contraelectromotriz será solamente proporcional a la velocidad de rotación y podremos poner

$$I = \frac{V - kn}{r + s}. \quad [4]$$

Para que la velocidad descienda de n a n', es preciso poner en serie con el motor una resistencia R_1 que con la intensidad I, produzca una caída de tensión $kn - kn'$, es decir, que debe cumplir la condición

$$kn - kn' = R_1 I,$$

de donde

$$R_1 = \frac{k}{I}(n - n'). \quad [5]$$

Para que la velocidad descienda de n' a n'', será preciso poner en serie con el motor una nueva resistencia R_2 que con la intensidad I produzca una caída de tensión $kn' - kn''$, es decir, que deberá cumplirse la condición

$$kn' - kn'' = R_2 I,$$

de donde

$$R_2 = \frac{k}{I}(n' - n'') \quad [6]$$

y así sucesivamente.

Para aplicar estas fórmulas, es preciso conocer la constante de proporcionalidad k. De la fórmula [4] se deduce

$$k = \frac{V - (r + s) I}{n}. \qquad [7]$$

Todas las cantidades del segundo miembro pueden conocerse experimentalmente y, por lo tanto, será fácil conocer k.

Los conductores resistentes se calcularán como para reguladores que son, y tendrán todos una misma sección ya que siempre deben ser recorridos por la corriente I.

Si las reducciones de velocidad que se desean son uniformes, es decir, si

$$n - n' = n' - n'' = n'' - n''' = \ldots$$

serán iguales todas las resistencias componentes

$$R_1 = R_2 = R_3 = \ldots = \frac{k}{I}(n - n') \qquad [8]$$

Ejemplo. — *Un motor de tranvías funciona en plena marcha a 550 voltios, consume 60 amperios, produce 485 voltios de fuerza contraelectromotriz y presenta una resistencia entre inductor e inducido de 0'25 ohmios. La velocidad normal que es de 750 vueltas por minuto, se desea reducirla a 560, 470 y 380. Calcular el reóstato.*

La constante será [7]

$$k = \frac{550 - 0'25 \times 60}{750} = 0'65\,,$$

y las hélices componentes [8]

$$R_1 = R_2 = R_3 = \frac{0'65}{60} \times 90 = 0'97 .$$

La resistencia total será

$$R = 3\,R_1 = 3 \times 0'97 = 2'91 .$$

Reóstato para aumentar la velocidad. — Cuando se trata de aumentar la velocidad sin alterar el gasto

$$I = \frac{V - e}{r + s}$$

deberá permanecer constante la fuerza contraelectromotriz e. Pero esta fuerza contraelectromotriz depende de la velocidad de rotación n y de la corriente de excitación i, luego para cualquiera velocidad debe permanecer constante el producto $n\,i$.

Cuando el motor marcha con su velocidad normal, es decir, antes de poner en circuito el reóstato regulador, la corriente de excitación es igual a la total consumida, y el producto es

$$n\,I$$

Si en paralela con el inductor s se monta un reóstato, que reduzca la corriente de excitación a $i_1\ i_2\ i_3 \ldots$ y aumente la velocidad a $n_1\ n_2\ n_3 \ldots$ tendremos

$$nI = n_1\,i_1 = n_2\,i_2 = \ldots$$

o también

$$\frac{I}{\frac{1}{n}} = \frac{i_1}{\frac{1}{n_1}} = \frac{i_2}{\frac{1}{n_2}} = \frac{i_3}{\frac{1}{n_3}} = \ldots$$

La corriente total I consumida por el inducido, se divide entre inductor y reóstato, marchando i_1 por el inductor e $I - i$, por el reóstato, de manera que

$$\frac{I - i_1}{i_1} = \frac{s}{R} \quad \text{ó} \quad R = \frac{s\, i_1}{I - i_1},$$

Substituyendo las intensidades por las inversas de las velocidades

$$R = \frac{s\,\frac{1}{n_1}}{\frac{1}{n} - \frac{1}{n_1}} = \frac{s\,n}{n_1 - n} \qquad [9]$$

que será la resistencia total del reóstato.

Si del reóstato R vamos suprimiendo las hélices $R_1\ R_2$ ... para que la velocidad vaya subiendo a $n_2\ n_3$ ... la fórmula anterior se convertirá sucesivamente en

$$R - R_1 = \frac{s\,n}{n_2 - n} \qquad [10]$$

$$R - R_1 - R_2 = \frac{s\,n}{n_3 - n}$$

....

y restando cada igualdad de la igualdad anterior, se obtiene:

$$R_1 = \frac{s\,n}{n_1 - n} - \frac{s\,n}{n_2 - n}$$

$$R_2 = \frac{s\,n}{n_2 - n} - \frac{s\,n}{n_3 - n} \qquad [11]$$

....

$$R_h = \frac{s\,n}{n_h - n}.$$

Es fácil calcular las intensidades de excitación en cada uno de los estados de funcionamiento, teniendo en cuenta que debe permanecer constante el producto $n\,i$; en efecto, de

$$n\,I = n_1\,i_1 = n_2\,i_2 = \ldots$$

se deduce

$$i_1 = \frac{n\,I}{n_1} \qquad i_2 = \frac{n\,I}{n_2} \ldots$$

Los diámetros de los hilos resistentes para formar las hélices R_1 R_2 ... se calcularán para las intensidades $I - i_1$ $I - i_2$... y los topes de contacto se calcularán todos para la intensidad $I - i_h$.

EJEMPLO. — *Un motor cuyo inductor tiene una resistencia de* 0'3 *ohmios gasta en marcha normal* 68 *amperios, con una velocidad de* 750 *revoluciones. Se desea un reóstato para aumentar la velocidad hasta* 770, 790, 810 *y* 830.

La resistencia total del reóstato, calculada por la fórmula [9] será

$$R = \frac{0'3 \times 750}{770 - 750} = 11'25$$

y las resistencias componentes, según las fórmulas [11]

$$R_1 = 5'625 \qquad R_2 = 1'875$$
$$R_3 = 0'9375 \qquad R_4 = 2'8125\,.$$

La constancia del producto $n\,i$ permite calcular las intensidades de excitación que deben cumplir las condiciones

$$750 \times 68 = 770 \times i_1 = 790 \times i_2 = 810 \times i_3 = 830 \times i_4$$

de donde se deduce

$$i_1 = \frac{750 \times 68}{770} = 66'2$$

$$i_2 = 64'6 \qquad i_3 = 63 \qquad i_4 = 61'5$$

Las hélices deberán calcularse para las intensidades

$$68 - 66'2 = 1'8 \qquad 68 - 64'6 = 3'4$$
$$68 - 63 \;\; = 5 \qquad 68 - 61'5 = 6'5$$

y los topes de contacto para 6'5 amperios.

CAPÍTULO VIII

REÓSTATOS PARA MOTORES ASÍNCRONOS Y ALTERNADORES

Objeto. — La energía consumida por una fase del estátor de un motor asíncrono de campo giratorio, tiene por espresión (tomo II, pág. 37)

$$V I \cos \varphi .$$

Esta energía se transforma en trabajo útil W_u que aparece en el eje del motor y en efecto Joule $r i^2$, que calienta los conductores del inducido. Tendremos, pues, la relación

$$V I \cos \varphi = W_u + r i^2 ,$$

de la cual se deduce

$$i^2 = \frac{V I \cos \varphi - W_u}{r} .$$

En el momento de lanzar la corriente al inductor, el rotor está parado y, por lo tanto, no hay trabajo útil, con la cual la intensidad será

$$i^2 = \frac{V\,I\cos\varphi}{r},$$

que puede alcanzar un valor peligroso para los devanados del inducido y determinará en la red de distribución una gran caída de tensión.

Existen diversos medios para evitar estos inconvenientes y mantener la intensidad dentro de límites no peligrosos; pero el más empleado, consiste en aumentar grandemente la resistencia del rótor durante el arranque y disminuirla gradualmente a medida que aumenta su velocidad, hasta anularla por completo cuando se alcanza la marcha normal.

Para practicar este medio, se devana el rótor en trifásico, reuniendo en un punto los principios de las tres fases y haciendo comunicar los fines con tres anillos colectores situados en el eje. Sobre estos anillos se apoyan tres frotadores que comunican con un reóstato triple de resistencia variable.

La figura 29 representa esquemáticamente esta disposición. *A*, *B*, *C* son los tres hilos de línea que llevan la corriente trifásica a los devanados *a*, *b*, *c* del inductor; *m*, *n*, *p* son los tres devanados del rótor, reunidos por uno de sus extremos en un punto *O*, y comunicando por sus otros extremos con los tres anillos colectores *N*, *M*, *P*. Sobre estos anillos se apoyan tres frotadores comunicando con las entradas de un triple reóstato *R*, cuyos brazos se reunen en estrella mediante la palanca giratoria de tres brazos.

Cuando el motor alcanza su marcha normal, la palanca suprime toda la resistencia del reóstato y

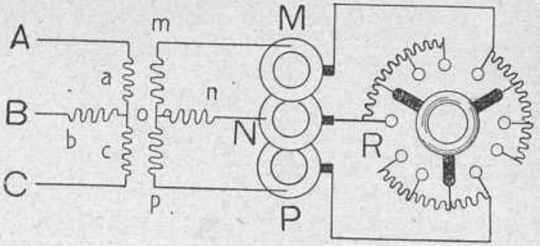

Fig. 29

deja en corto circuito las escobillas. Para poner en corto circuito los anillos colectores no vale la pena de mantener los rozamientos, desgastes y contactos inseguros a que siempre dan lugar las escobillas. El motor lleva un mecanismo sencillo, que mediante un solo movimiento de palanca levanta las escobillas y pone en corto circuito los tres devanados del rótor.

Este reóstato triple es el *reóstato de arranque.*

Si la palanca del reóstato no llega a poner en corto circuito los frotadores, el motor marcha con menor velocidad que la normal, de manera que el mismo reóstato de arranque puede servir para *reductor de velocidad.*

En estos motores no puede acelerarse la marcha más allá de la normal; no tienen por lo tanto reóstato regulador para aumento de velocidad.

Cálculo del reóstato. — Cuando se lanza la corriente al estátor de un motor asincrónico trifásico, teniendo parado el rótor, la acción del estátor sobre el rótor es completamente igual a la del primario sobre el secundario de un transformador y, por lo tanto, en el rótor nace una tensión inicial V_h. Cuando el rótor empieza a moverse siguiendo la rotación del flujo giratorio, el flujo cortado por los conductores inducidos, disminuye, y con él la tensión V_o; de manera que si el rótor llegase a alcanzar la velocidad del sincronismo, el flujo cortado sería cero y desaparecería la tensión en el devanado inducido.

Para la velocidad de marcha normal, la tensión en el rótor tiene un valor V, menor que V_o, que se fija al proyectar el motor. La relación de tensiones

$$\frac{V}{V_o} = s$$

se llama *deslizamiento*, y su valor oscila entre 0'01 y 0'20, según el tipo de los motores que se estudien y según su potencia.

El valor de s puede determinarse experimentalmente con mucha facilidad en un motor cualquiera. Basta para ello medir la tensión entre los anillos colectores, sin comunicar con el reóstato, cuando el motor tiene su velocidad normal y cuando está completamente parado.

Calcularemos el reóstato con la misma condición que calculamos el de los motores shunt de corriente continua (capítulo VI), es decir, con la condición de que la intensidad en una fase del inducido no pase de un límite I previamente fijado.

Llamemos R a la resistencia total de cada una de las ramas del reóstato triple y r a la de cada una de las fases del inducido. En el momento de cerrar el interruptor la tensión y, por lo tanto, la intensidad, alcanza su máximo

$$I = \frac{V_o}{2\,(r + R)}$$

y recordando que

$$V_o = \frac{V}{s}\,.$$

podremos escribir

$$I = \frac{V}{2\,s\,(r + R)}$$

de donde

$$R = \frac{V}{2\,s\,I} - r \qquad [1]$$

fórmula que nos dará la resistencia total de una rama del reóstato.

Arranca el motor y en cuanto rueda, disminuye la tensión inducida hasta un valor V_1. La resistencia del reóstato, puesta en serie con el rótor, obra como reóstato regulador de velocidad y no permite sino una velocidad de rotación muy inferior a la normal, para lo cual la tensión baja hasta V_1 y la corriente se reduce a

$$i = \frac{V_1}{2(R + r)}.$$

En este momento, suprimimos la primera hélice R_1 de cada una de las ramas del reóstato y la intensidad sube nuevamente al máximo tolerado

$$I = \frac{V_1}{2(R + r - R_1)}$$

Dividiendo miembro a miembro las dos fórmulas últimas

$$\frac{i}{I} = \frac{R + r - R_1}{R + r} = 1 - \frac{R_1}{R + r} \qquad [2]$$

de donde se deduce

$$R_1 = \left(1 - \frac{i}{I}\right)(R + r), \qquad [3]$$

que será la resistencia de la primera hélice.

Rueda el motor ganando velocidad, hasta alcanzar la que le permite el reóstato que tiene puesto en serie, y reduce la tensión inducida a V_2, dando una corriente

$$i = \frac{V_2}{2(R + r - R_1)}.$$

En este momento suprimimos del reóstato sus segundas hélices y la intensidad sube nuevamente al máximo tolerado

$$I = \frac{V_2}{2\,(R + r - R_1 - R_2)}$$

Dividiendo miembro a miembro las dos últimas fórmulas

$$\frac{i}{I} = \frac{R + r - R_1 - R_2}{R + r - R_1} = 1 - \frac{R_2}{R + r - R_1}$$

de donde

$$R_2 = \left(1 - \frac{i}{I}\right)(R + r - R_1)\,.$$

Esta fórmula nos dará el valor de la segunda hélice; pero es fácil deducir un valor de otro.

Dividamos R_2 por R_1:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R + r - R_1}{R + r} = 1 - \frac{R_1}{R + r},$$

que recordando el valor [2] se transforma en

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{i}{I} \quad \text{ó} \quad R_2 = R_1 \frac{i}{I} \qquad [4]$$

Los razonamientos y cálculos empleados para deducir esta fórmula los repetiríamos para deducir todas las demás hélices del reóstato, llegando a la sencilla regla siguiente.

Una hélice cualquiera es igual a la anterior multiplicada por la constante $\frac{i}{I}$, de manera que para calcular el reóstato, se procederá de este modo:

Conocida la intensidad normal i, se fija la intensidad máxima I que pueda tolèrarse. Por la fórmula [1] se calcula la resistencia total del reóstato. Por la fórmula [3] se calcula la primera hélice y por la regla última se van calculando hélices hasta que la suma de sus resistencias sea igual a la resistencia total.

Conductores resistentes y topes. — Como reóstato de arranque que es, calcularemos la sección de sus conductores resistentes mediante la fórmula (página 57)

$$s = a\,I\sqrt{\frac{\theta}{t_2 - t_1}}\ \text{mm.}^2,$$

siendo I el amperaje máximo tolerado.

Los topes de contacto se calcularán como siempre, fijando una densidad de corriente de 0'8 a 1'6 amperios por milímetro cuadrado.

La palanca de tres brazos que cierra la estrella del reóstato, se fijará atendiendo más bien a sus condiciones mecánicas que a sus funciones eléctricas.

EJEMPLO. — *Calcular el reóstato de arranque para un motor que tiene las siguientes condiciones:*

Tensión en el inducido a plena marcha, 35.
Deslizamiento, 0'08.
Corriente normal en el inducido, 93.
Corriente máxima tolerada, $2 \times 93 = 186$.
Resistencia de una fase del inducido, 0'01.

La resistencia total de una rama del reóstato, vendrá dada por la fórmula [1]:

$$R = \frac{35}{2 \times 0'08 \times 186} - 0'01 = 1'16.$$

La primera hélice [3]

$$R_1 = (1 - 0'5)\,(1'16 + 0'01) = 0'585$$

y las demás calculadas por el procedimiento indicado, serán:

$$R_2 = 0'293 \qquad R_3 = 0'146 \qquad R_4 = 0'073$$
$$R_5 = 0'036 \qquad R_6 = 0'018 \qquad R_7 = 0'009.$$

Tomando seis hélices, dan una suma de 1'152 ohmios y tomando siete llegan a 1'161.

La sección de los conductores resistentes y la superficie, de contacto de los bloques, se calcularán para 186 amperios.

Reóstato para alternadores. — En el tipo corriente de alternadores, se emplea para la excitación de sus inductores el método de la *excitación independiente*, utilizando la corriente continua producida por una dínamo de esta clase, llamada *excitatriz*.

La excitatriz va provista de su reóstato regulador de tensión, y puede conseguirse que produzca un voltaje perfectamente constante, cualquiera que sea la corriente que se le saque.

La corriente de excitación consumida por el alternador, es variable, ya que la fuerza electromotriz que debe producir el alternador, varía con el amperaje

$$E = V + r\,I\,,$$

según sabemos (tomo I, pág. 99).

Para regular esta fuerza electromotriz, es decir, para regular la corriente de excitación, se intercala un reóstato R (fig. 30) entre la excitatriz E y los anillos colectores C que llevan la corriente al inductor P.

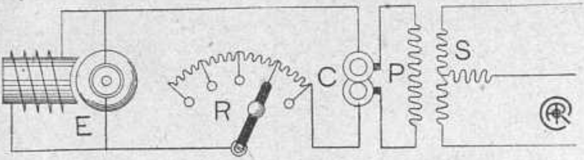

Fig. 30

Sea V la tensión constante que la excitatriz debe producir; p la resistencia del inductor del alternador; i_o, i_n, las corrientes de excitación necesaria en los dos casos extremos de funcionamiento del alternador, esto es, cuando funciona en vacío y cuando funciona en plena carga. La resistencia total R del reóstato y su última hélice R_n deberán cumplir las condiciones siguientes:

$$i_o = \frac{V}{p + R} \qquad i_n = \frac{V}{p + R_n}$$

de donde

$$R = \frac{V}{i_o} - p \qquad [5] \qquad R_n = \frac{V}{i_n} - p \qquad [6]$$

Para determinar las hélices componentes, puede procederse experimentalmente conexionando la excitatriz y el alternador, como se indica esquemáticamente en la figura 31, siendo N y M resistencias líquidas de las empleadas en los talleres; I y G los amperímetros que miden las corrientes de excitación y del circuito exterior del alternador, y V un voltímetro.

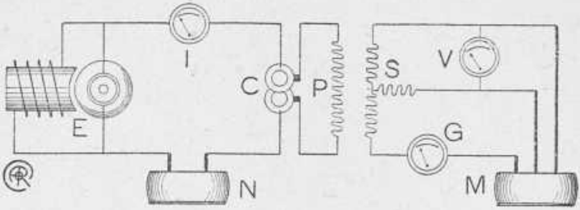

Fig 31

Sea V' el máximo de tensión que puede consentirse en el alternador.

Se arregla la resistencia M para que el amperímetro G nos marque la máxima corriente que el alternador debe producir, y, a la vez, se arregla la resistencia N para que el voltímetro V señale la tensión normal. Anotemos entonces la corriente de excitación i_h marcada por el amperímetro I, y este valor nos servirá para calcular la resistencia R_h mínima del reóstato, mediante la fórmula [6]. Este valor puede ser cero sin ningún inconveniente.

Aumentemos la resistencia M para que disminuya el gasto del alternador, hasta que la tensión marcada por el voltímetro V suba al máximo tolerado V'. Aumentemos también la resistencia N para que la tensión vuelva nuevamente a ser la normal

V y veamos la corriente i_{h-1} marcada por el amperímetro I. Tendremos, como antes,

$$R_h + R_{h-1} = \frac{V}{i_{h-1}} - p$$

y restando de aquí la fórmula [6], obtendremos:

$$R_{h-1} = \frac{V}{i_{h-1}} - \frac{V}{i_h} \qquad [7]$$

Procediendo del mismo modo, obtendremos

$$R_{h-2} = \frac{V}{i_{h-2}} - \frac{V}{i_{h-1}} \qquad [8]$$

y así sucesivamente, hasta llegar a obtener en G la carga nula y en I la corriente mínima i_o, con lo cual calcularemos la primera hélice

$$R_o = \frac{V}{i_o} - \frac{V}{i_1} \qquad [9]$$

Los diámetros de los hilos resistentes se calcularán como reguladores según se ha dicho más atrás, teniendo en cuenta que por la primera hélice R_o circula una corriente máxima i_o; por la segunda R_1 circula una corriente máxima i_1, y así sucesivamente hasta la última R_h, por la cual circula una corriente máxima i_h.

EJEMPLO. — *Calcular el reóstato para un alternador que debe producir una carga máxima de 100 amperios, teniendo su inductor 40 ohmios de resistencia, y funcionando su excitatriz a 120 voltios.*

Supongamos efectuadas todas las mediciones experimentales que hemos dicho en la teoría y admitamos los resultados siguientes:

$i_{10} = 3 \quad i_9 = 2'98 \quad i_8 = 2'93 \quad i_7 = 2'88$
$i_6 = 2'83 \quad i_5 = 2'78 \quad i_4 = 2'71 \quad i_3 = 2'66$
$i_2 = 2'60 \quad i_1 = 2'55 \quad i_0 = 2'50$

La resistencia total del reóstato será, según la fórmula [5],

$$R = \frac{120}{2'50} - 40 = 8$$

y las hélices componentes, según las fórmulas [6], [7], [8] ...

$$R_{10} = \frac{120}{3} - 40 = 0 \quad R_9 = \frac{120}{2'98} - \frac{120}{3} = 0'78$$

$R_8 = 0'80 \quad R_7 = 0'8 \quad R_6 = 0'83 \quad R_5 = 0'85$
$R_4 = 0'87 \quad R_3 = 0'89 \quad R_2 = 0'90 \quad R_1 = 0'92$
$R_0 = 0'94$

La suma de las hélices componentes es 8'58, luego puede aceptarse el cálculo.

Los diámetros para los conductores resistentes se calcularán teniendo en cuenta que las intensidades máximas para las hélices R_{10} R_9 R_8 ... son 3, 2'98, 2'93 ... amperios. Los topes de contacto se calcularán todos para 3 amperios.

CAPÍTULO IX

Reóstatos para arcos voltaicos

Objeto. — La tensión que necesita un arco voltaico depende de la longitud de arco, es decir, de la separación entre carbones. Generalmente se fija para los arcos una longitud de 2 a 4 milímetros, lo cual exige una diferencia de potencial entre las puntas de los carbones, de 40 a 45 voltios.

Teniendo en cuenta la caída de tensión que originan los carbones y los electroimanes de los reguladores, puede fijarse para valor de la tensión entre los bornes del aparato, unos 50 ó 55 voltios.

La perfección alcanzada en la construcción de los reguladores, permite reducir la separación entre carbones y, por lo tanto, el voltaje de alimentación. llegándose hoy a mantener los arcos voltaicos a 25 voltios solamente.

Montados los arcos voltaicos en canalizaciones que tienen una diferencia de potencial muy superior a la que necesitan, será preciso consumir el exceso de tensión para que a los bornes del arco llegue solamente la que conviene a su buen funcionamiento.

Cuando la canalización es de corriente alterna, puede producirse la caída de tensión mediante una reactancia, que consume voltios sin consumir vatios. El cálculo de estas reactancias fué estudiado detenidamente en el tomo II capítulo III.

Si la canalización es de corriente continua, la caída de tensión debe producirse necesariamente mediante resistencias óhmicas llamadas *resistencias adicionales de los arcos*, que además de rebajar la tensión, cumplan otros fines no menos importantes.

Para que el arco voltaico se inicie es preciso que los carbones lleguen a tocarse durante un instante, separándose luego; de manera que el arco al encenderse, produce siempre un corto circuito, que sin la resistencia adicional sería un peligro seguro para la línea, para el generador y para todos los demás receptores de la canalización.

Por lo tanto, debe montarse resistencia adicional en los arcos voltaicos, aun cuando la tensión de la línea sea igual a la tensión de funcionamiento. En este caso, la resistencia adicional se quita a mano o automáticamente en cuanto el arco está encendido, y se llama *resistencia de encender*.

Otro objeto cumple todavía la resistencia adicional. Cuando al arco llega un exceso de corriente, los carbones se calientan excesivamente y su resistencia disminuye, ya que el carbón tiene negativo su coeficiente de temperatura (cap. I). En cambio, la resistencia adicional aumenta su efecto con la temperatura, porque los metales tienen positivo aquel coeficiente. De este modo, pueden compensarse los efectos y permanecer sensiblemente constante la resistencia del circuito.

Cálculo de la resistencia adicional. — Sieno V la tensión de la canalización y V' la que fijamos como necesaria para el buen funcionamiento del arco, el reóstato adicional deberá producir una caída de tensión de

$$e = V - V' \text{ voltios,}$$

para lo cual debe tener una resistencia

$$R = \frac{e}{I} = \frac{V - V'}{I} \text{ ohmios}.$$

Para fijar el diámetro del hilo resistente tendremos en cuenta que se trata de un regulador, és decir, de un reóstato que va a permanecer en circuito todo el tiempo que el arco esté encendido. Calcularemos el diámetro, como en el capítulo II, fijando el número de centímetros cuadrados que deben corresponder a cada vatio transformado en calor por efecto Joule. Este número será mayor o menor, según que se desee construir un reóstato bueno o un reóstato barato.

Fijando en 5 el número de centímetros cuadrados por vatio, hemos hallado las fórmulas

$$d = 0'027 \sqrt[3]{I^2} \text{ cm. para el hierro,}$$
$$d = 0'039 \sqrt[3]{I^2} \text{ — para el mélchior.}$$

Conocido el diámetro y la resistencia R, que debe presentar, calcularemos la longitud del hilo resistente mediante la fórmula

$$l = \frac{\pi d^2 R}{4\rho}$$

que reduciendo sus coeficientes numéricos, se convierte en

$$l = 785\ d^2\ R \text{ m. para el hierro,}$$
$$l = 392.\ d^2\ R \text{ — para el mélchior.}$$

Esta longitud total se divide en partes iguales, arrollándose en hélices que se instalan en la forma más conveniente según el sitio de que se dispone para su colocación.

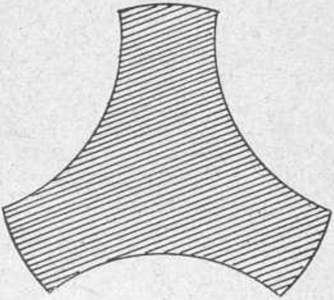

Fig. 32

Cuando los hilos son finos y no muy largos, se arrollan en una sola hélice alrededor de un cilindro de porcelana de gran diámetro. Para facilitar el enfriamiento del hilo, se le hacen al cilindro algunas canales en el sentido de su longitud, quedando su sección de la forma indicada en la figura 32, con lo cual, el hilo al pasar sobre la canal, queda sin contacto con la porcelana y bien dispuesto para su enfriamiento.

EJEMPLO. — *Calcular la resistencia adicional para un arco de 25 amperios que necesita* 60 *voltios y está instalado en una red de* 120 *voltios.*

La resistencia total será

$$R = \frac{120 - 60}{25} = 2'4 \text{ ohmios}.$$

Supongamos que puede disponerse de abundante espacio para instalar el reóstato y atenderemos para su construcción solamente a la mayor economía.

Adoptemos el hilo de hierro y fijando cinco centímetros cuadrados por vatio transformado en calor, calcularemos el diámetro por la fórmula conocida

$$d = 0'027 \sqrt[3]{25^2} = 0'23 \text{ cm.}$$

La longitud de hilo será

$$l = 785 \times 0'23^2 \times 2'4 = 90'68 \text{ m.}$$

El volumen de metal empleado es

$$0'23 \times 9068 = 2085'64 \text{ cm.}^3$$

y siendo la densidad del hierro 8'3 resulta un peso de

$$2085'64 \times 8'3 = 17310 \text{ gramos.}$$

Para apreciar la influencia que tiene en el resultado, el número de centímetros asignados por vatio transformado en calor, vamos a repetir el cálculo del conductor tomando solamente 3 cm.^{2} por vatio. El diámetro del hilo será

$$d = 0'0229 \sqrt[3]{25^2} = 0'19 \text{ cm.}$$

La longitud

$$l = 785 \times 0'19^2 \times 2'4 = 72'80 \text{ m.}$$

y el peso de metal empleado

$$0'19 \times 7280 \times 8'3 = 11886 \text{ gramos.}$$

Hay una diferencia de 5424 gramos.

ÍNDICE

J G

REOSTATOS INDUSTRIALES