

BIBLIOTECA DEL ELECTRICISTA PRÁCTICO

LÍNEAS
ELÉCTRICAS



GALLACH-EDITOR

13

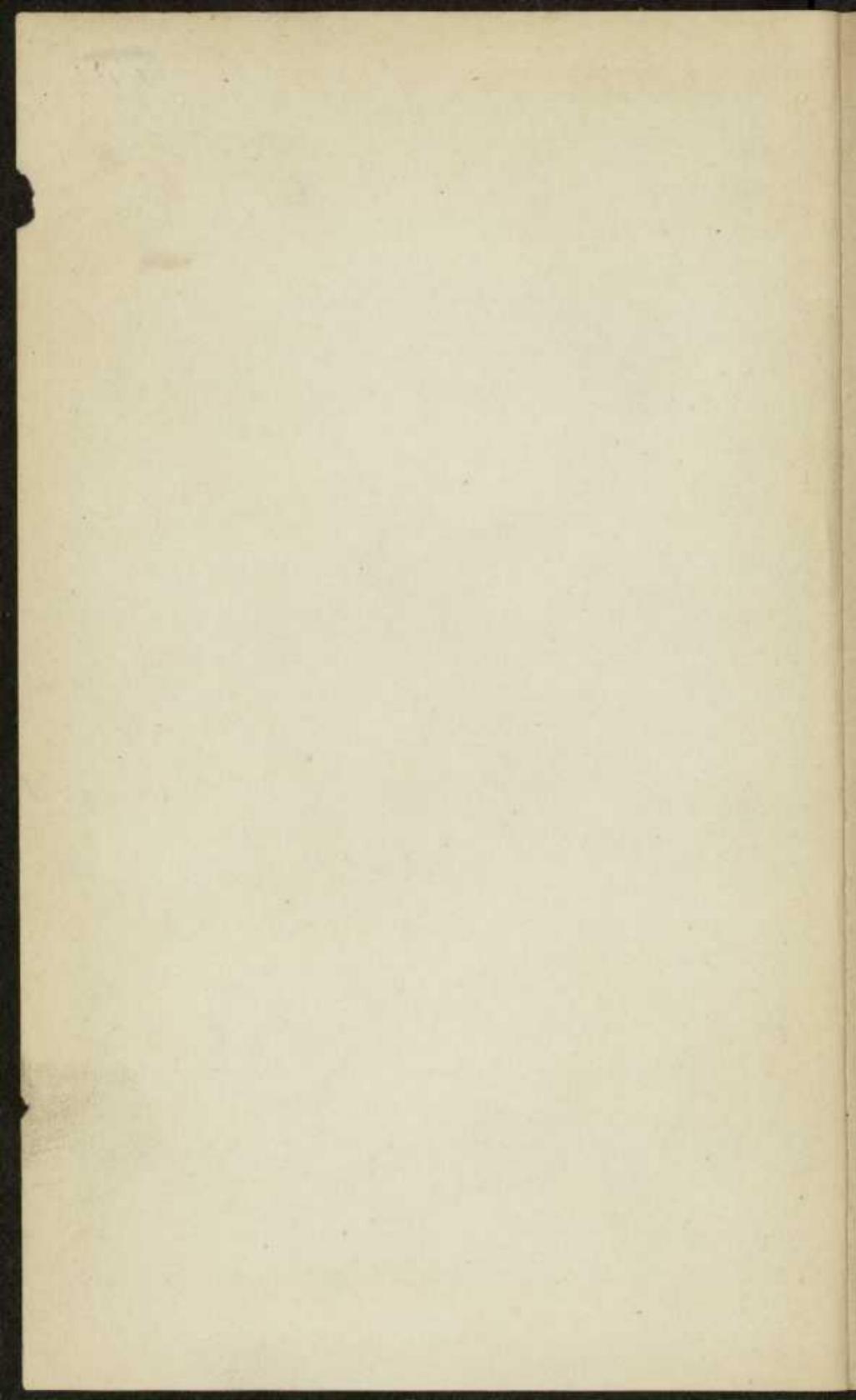
BARCELONA



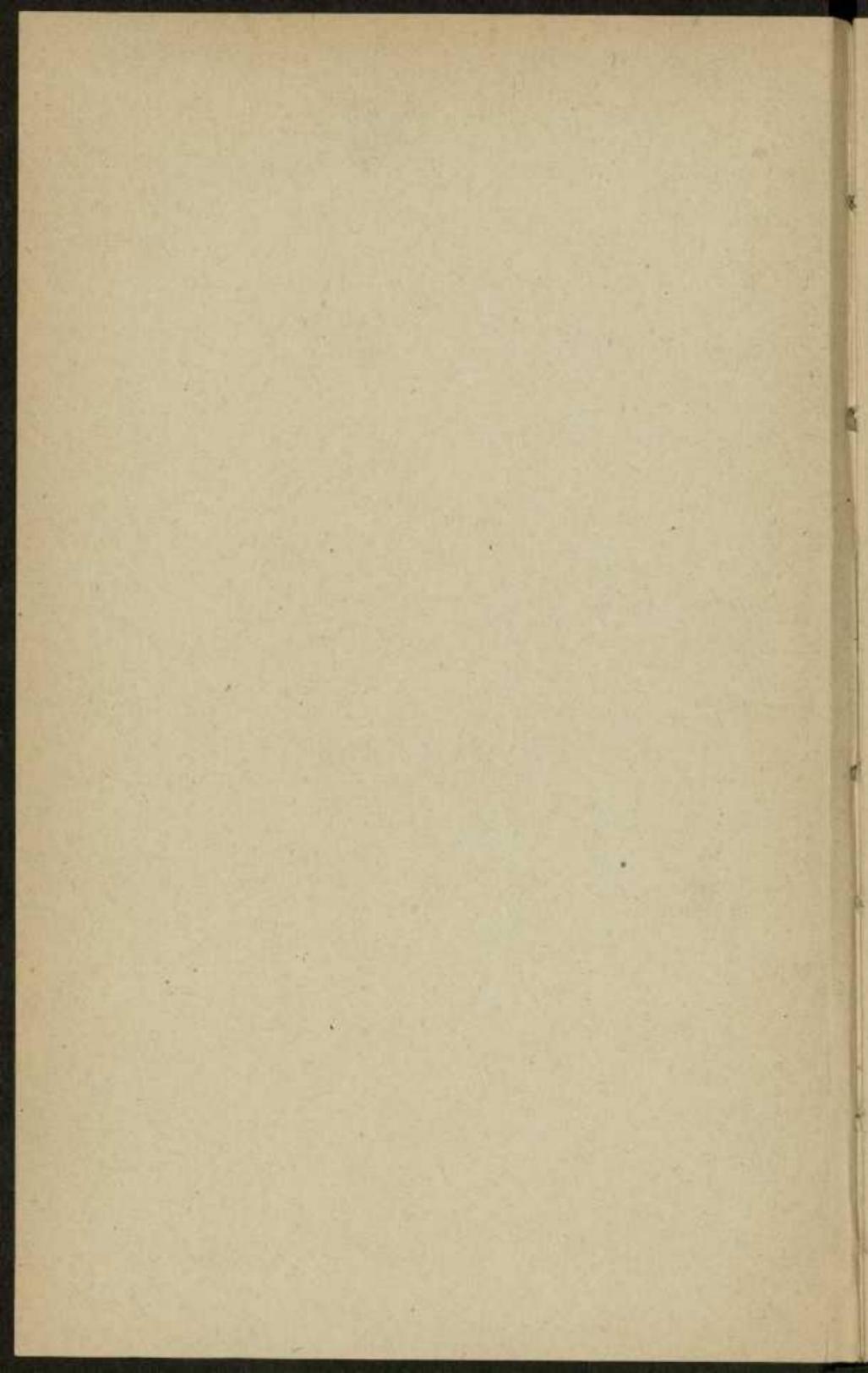
25446

~~21666~~

2546



LÍNEAS ELÉCTRICAS



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 XIII

Líneas Eléctricas

— POR —

D. RICARDO CARO Y ANCHÍA

PROFESOR EN LA ESCUELA INDUSTRIAL DE TARRASA

SEGUNDA EDICIÓN

E.P. BURGOS
R.P.
N.º 99189
C.S.
25446

« CALPE »

Compañía Anónima de Librería, Publicaciones y Ediciones

MADRID-BARCELONA

ES PROPIEDAD
Derechos de traducción
reservados

LÍNEAS ELÉCTRICAS

CAPÍTULO PRIMERO

LÍNEAS ELÉCTRICAS AÉREAS

Generalidades. — Al hablar de líneas eléctricas y transmisión de energía, en una obra de Electrotecnia publicada en 1907, decíamos lo siguiente:

«En España, donde tanto abundan los ríos de curso accidentado, es de esperar que el aprovechamiento de saltos, ya iniciado, se generalice rápidamente, obteniéndose así luz y fuerza en condiciones sobradamente económicas, para imprimir rápido progreso a nuestras industrias.»

Felizmente, estas profecías se han cumplido quizás más rápidamente de lo que nos hacía soñar nuestro desco patriótico, y en pocos años hemos visto cruzar con numerosas líneas eléctricas toda nuestra España, y especialmente la industriosa región catalana, donde se encuentran hoy las obras hidroeléctricas más atrevidas y potentes de Europa.

En un discurso inaugural de 1915, escribíamos, a este propósito, lo siguiente:

«... en el momento actual, los campos de Tarrasa se ven cruzados por dos líneas de esta clase, que transportan 80000 caballos cada una. Pero sus hilos, de reflejos dorados, que se mecen silenciosos, acariciados por la brisa, como inofensivos saltadores de niñas gigantes, son espadas de Damocles suspendidas sobre nuestras cabezas, pues en ellos, con el rayo, se alojan el incendio y la muerte.

»En nuestras fábricas de Tarrasa, las gigantescas chimeneas, que fueron atalayas del progreso y símbolos del trabajo; las que han dado carácter a la silueta de las ciudades industriales, han perdido ya su majestuoso penacho de humo, su glorioso airón, rindiéndose el motor térmico al formidable empuje del eléctrico motor.»

Tan rápidamente se desarrollan estas empresas de transmisión de energía eléctrica, que en 1917 fueron ya tres las líneas de alta tensión, que pasaban por las proximidades de Tarrasa: «La Energía Eléctrica de Cataluña» y «Riegos y Fuerza del Ebro», con dobles líneas trifásicas de 100000 voltios de tensión, y «La Catalana», con una línea trifásica sencilla de 130000 voltios, la mayor tensión de Europa.

Circuitos eléctricos. — Para llevar la corriente eléctrica desde el generador que la produce hasta el receptor que la utiliza, es preciso unir ambos aparatos mediante hilos conductores que forman la línea o canalización eléctrica.

La circulación de la corriente exige que la línea esté formada por dos conductores, que podemos

llamar de ida y de vuelta respectivamente. Únicamente en los casos de la telegrafía y de la tracción eléctrica se forma la línea con un solo conductor, utilizando la conductibilidad o capacidad del suelo para vuelta de la corriente. En telegrafía, no presenta inconveniente el empleo de la tierra, y sí, en cambio, ofrece gran economía de conductor.

En el caso de los tranvías, la comunicación con tierra debe ofrecer especiales condiciones de seguridad para ser aceptable; pero procura también gran economía de cobre, a la vez que simplifica la toma de corriente.

Para evitar toda confusión en el estudio que vamos a emprender, convengamos, desde ahora, en llamar *longitud de línea* a la distancia que media entre el generador y el receptor, medida según el camino seguido por la canalización, y *longitud de conductor* a la suma total de los hilos empleados en la canalización. Así, por ejemplo, en el caso de los tranvías de corriente continua, la longitud de conductor es igual que la longitud de línea; pero, en cambio, cuando la canalización exija n hilos, la longitud de conductor será n veces mayor que la longitud de línea.

Clasificación de las canalizaciones. — Las canalizaciones eléctricas se clasifican, según el medio en que están colocadas, en *canalizaciones aéreas*, *subterráneas* y *sumergidas*.

Las primeras se constituyen por hilos generalmente desnudos, sostenidos por postes de madera

o hierro, con el intermedio de cuerpos aisladores que eviten las pérdidas a tierra.

Las canalizaciones enterradas o sumergidas en el agua, deberán formarse por conductores de cobre, protegidos por cubiertas aisladoras, a las que no ataque la humedad, ni los animales que puedan llegar a su superficie. Generalmente la cubierta tiene dos partes, aisladora una y protectora la otra, formándose la primera con fibras embetunadas y la segunda con tubos, hilos o cintas metálicas.

Respecto a la corriente conducida, clasificaremos las canalizaciones en *líneas para corriente continua*, *líneas para corriente alterna* y *líneas para corrientes débiles*, como son las de timbres, telefonía y telegrafía.

Atendiendo al objeto que con la canalización se persigue, las clasificaremos en *líneas de transmisión* y *redes de distribución*. Las primeras tienen por objeto transmitir una potencia eléctrica a cierta distancia, para alimentar receptores colocados únicamente al final de la línea. Las segundas tienen por objeto llevar la corriente a una agrupación de receptores extendidos en toda el área que la red cubre.

El estudio de las canalizaciones eléctricas debe comprender: el cálculo de los conductores, su instalación y las pruebas que deben efectuarse durante la instalación y después de terminada ésta.

Conductores de cobre. — En las canalizaciones industriales para distribución de luz y fuerza, se emplea casi exclusivamente el cobre, puro o conve-

nientemente aleado, para mejorar sus condiciones mecánicas. Actualmente se preparan cobres aleados, cuya conductibilidad iguala a la del cobre puro.

El precio del cobre está sujeto a enormes y rápidas fluctuaciones, que alcanzan a veces hasta el 150 por 100 de su valor normal. Esto hace que la compra y venta del cobre, constituya una verdadera operación bancaria, en la cual puedan ganarse o perderse importantes cantidades.

El cobre se emplea como conductor eléctrico, en forma de hilos cilíndricos, mientras su diámetro no pase de 6 milímetros, que corresponde a una sección de 28'27 milímetros cuadrados. Para secciones o diámetros superiores, es siempre preferible el cable formado por hilos de poco diámetro, retorcidos a manera de cuerda.

El cable es algo más caro que el conductor cilíndrico, por su elaboración; pero, en cambio, es más flexible, más manejable y menos costoso su tendido.

Únicamente en las redes de tranvías, para el cable de trabajo, se emplean conductores cilíndricos que alcanzan diámetros de 10 y 12 milímetros.

La forma que generalmente se da a los conductores eléctricos es la cilíndrica; pero se concibe que para aumentar su superficie de enfriamiento, sería más conveniente emplear conductores en forma de cinta ancha y fina.

En la instalación de cuadros de distribución, inducidos de generadores, conexión de acumuladores, etcétera, se emplean los conductores en forma de barras prismáticas.

También desde el punto de vista del mejor en-

friamiento, es preferible el cable de hilos múltiples al hilo único, ya que el primero tiene mayor superficie que el segundo, a igualdad de sección.

Para líneas telefónicas, se emplean bronces especiales, en los cuales se busca gran resistencia mecánica, por ser generalmente conductores de muy escasa sección. No se emplea el hierro, porque su cualidad magnética perjudica la buena transmisión fónica.

Conductores de aluminio. — Para estas mismas canalizaciones, empieza a emplearse también el aluminio, de menor peso y de más bajo precio que el cobre, aunque de mayor resistividad.

A igualdad de potencia transmitida, dos kilogramos de cobre son substituídos por uno de aluminio. Esto es una ventaja a favor del aluminio, en cuanto al precio de instalación, y en cuanto al peso de la línea sobre los apoyos.

Otra ventaja presenta el aluminio y es que las sales que se forman en su superficie, por la acción del aire salino del mar o de los vapores corrosivos que se desprenden de las fábricas de productos químicos, son insolubles y forman una capa de protección contra nuevos ataques, cosa que no ocurre en los conductores de cobre.

Se señalan al aluminio los inconvenientes de su soldadura difícil, su poca resistencia mecánica y su ductilidad excesiva.

Los actuales estudios sobre estos asuntos, hacen concebir esperanzas de que lleguen a corregirse o a disminuirse los inconvenientes del aluminio, y a

que su adopción para las líneas eléctricas vaya ganando terreno de día en día.

En España se ha empleado ya para los *feeders*, o alimentadores de algunas redes de tranvías, la de «San Sebastián a la frontera francesa» entre otras.

Otra ventaja indiscutible del aluminio, es su abundancia en la naturaleza. La industria de su fabricación, podrá siempre hacer frente a las necesidades del mercado, y equilibrándose la demanda con la oferta, serán imposibles las enormes fluctuaciones señaladas al cobre.

Ultimamente en Francia, sólo con el fin de equilibrar su balanza comercial, sustituyendo el cobre, producto de importación, por el aluminio, producto francés, y obedeciendo a un informe favorable dado por una comisión técnica de la Unión de los Sindicatos de la Electricidad, ha sido declarado poco menos que obligatorio el uso del aluminio para las nuevas líneas eléctricas.

Conductores de hierro. — Parece fuera de duda, que el hierro puede emplearse para constituir conductores eléctricos cuando las líneas son cortas y las intensidades a transmitir no son muy elevadas. Porque, de todos modos, con poca longitud y pequeña intensidad, hay que poner secciones excesivas de cobre, por la débil resistencia mecánica que presenta este metal. Para la usual separación de postes, la mínima sección aceptable de cobre, es la de 12 milímetros cuadrados. Cuando el cálculo de secciones permita una inferior a los 12 milímetros cuadrados, podremos substituir el cobre por

el hierro, y resultará económicamente aceptable, porque si su resistencia es seis u ocho veces mayor, en cambio, su precio es cinco a seis veces menor.

Las caídas de tensión, en una línea de la misma longitud y sección, según sean los conductores de hierro o de cobre, están en la relación (tomo I, página 98).

$$\frac{V_h}{V_c} = \frac{R_h I}{R_c I} = \frac{\rho_h \frac{l}{s} I}{\rho_c \frac{l}{s} I} = \frac{\rho_h}{\rho_c}$$

En la práctica no es exacta esta proporcionalidad entre las caídas de tensión y las resistividades de los metales. Puede adoptarse como fórmula práctica la siguiente:

$$\frac{V_h}{V_c} = k \frac{\rho_h}{\rho_c}$$

El coeficiente numérico k , varía con la intensidad que circula. Es igual a uno, cuando la intensidad es menor de medio amperio; crece con la intensidad y llega a ser 7 cuando circulan 15 amperios.

Ante el precio elevadísimo alcanzado por el cobre, con motivo de la guerra europea, se puso sobre el tapete, como cuestión económica de palpitante actualidad, *la substitución del cobre por el hierro en las líneas de alta tensión*; y en febrero de 1917, el eminente electricista español, señor Pérez del Pulgar, de la Compañía de Jesús, publicó en *La Energía Eléctrica* (núms. 3 y 4) un notable estudio comparativo de las pérdidas en una línea.

Dos causas de pérdida señala el señor Pérez del Pulgar en un hilo de hierro: *la resistencia óhmica y el efecto pelicular.*

La primera causa es de sobra conocida, y la segunda tiene el siguiente origen.

Al pasar la corriente por un conductor cualquiera, desarrolla en su derredor un campo magnético (tomo I, página 115), cuyo flujo, cortado por la misma masa metálica del conductor, origina en ella corrientes de Foucault. Estas corrientes tienen mayor importancia en los conductores de hierro, porque siendo más permeable al magnetismo, que el cobre, es mayor el flujo. Además, siendo el hierro metal magnético, sufre pérdidas por histeresis cuando se le somete a la acción de un flujo alterno, y alterna hay que suponer la corriente en cuanto se habla de alta tensión.

Los efectos Foucault y de histeresis (tomo I, página 46), combinados en un conductor de hierro, constituyen el *efecto pelicular.*

El señor Pérez del Pulgar deduce de sus experimentos y cálculos, que «las pérdidas por efecto pelicular desaparecen sensiblemente para hilos de menos de dos milímetros de diámetro, y que, por consiguiente, lo mejor sería emplear *cable* formado por mayor o menor número de ellos, según la sección que se desea.»

Esta conclusión está perfectamente de acuerdo con las siguientes reglas, dadas en 1914 por la *Verband Deutscher Elektrotechniker*:

«1.^a Adoptar cables formados de hilos cuyas secciones no lleguen a los 2 milímetros cuadrados.

2.^a Contar con una resistencia específica de 0'126 milímetros.

3.^a Contar que las dificultades de instalación, soldaduras, etc., aumentan el precio de la mano de obra en líneas de hierro, comparada con la de líneas de cobre.

4.^a Recomendar el mayor esmero en los empalmes de hierro con cobre, para evitar los efectos térmicos, cuando las densidades de corriente son elevadas.»

En telegrafía, se emplean siempre corrientes muy débiles; por lo tanto, pueden emplearse hilos de hierro galvanizados, para evitar su oxidación, ganándose conductancia a expensas de grandes secciones, lo cual puede aceptarse dado el bajo precio del hierro. Se emplean también hilos bimetálicos formados por un alma de acero, que les da dureza, y una capa exterior de cobre que les da conductancia. La adopción de aparatos telegráficos rápidos, obliga a mejorar las condiciones eléctricas de las líneas, y en España han empezado ya a tenderse líneas telegráficas de bronce de 2 milímetros de diámetro.

Condiciones generales de los postes. — En una línea de alta tensión, debe siempre procurarse, *en cuanto a postes, que sean pocos y buenos.*

Cada poste es un punto peligroso para el buen aislamiento de la línea. El poste de hierro, el poste de madera cuando está húmeda y el poste de cemento armado, son caminos, más o menos resistentes, que se ofrecen a la corriente para pasar a tierra.

Por otra parte, cada poste es un gasto de adquisición, de transporte, de instalación y de conservación.

Decididamente conviene reducir cuanto se pueda el número de postes en una línea eléctrica.

Si los postes son pocos, deberán estar muy espaciados, y, por lo tanto, deben ser muy robustos para resistir el peso y la tracción que suponen los largos trozos de conductor que deben soportar.

Son también condiciones recomendables de los postes, que sean económicos, ligeros, fáciles de transportar y de instalar, y fácil el colocar en ellos los soportes y aisladores.

Para líneas de alta y media tensión, la altura de los postes será la necesaria para que el conductor más bajo de la línea, en el punto más bajo de su vano, quede sobre cualquier punto del terreno que cruza, a una altura mínima de seis metros, excepción hecha de puntos inaccesibles para las personas, donde se podrá reducir la altura a cuatro metros.

El empotramiento de los postes se determina en armonía con las condiciones del terreno y con la resistencia de aquéllos, en evitación de todo hundimiento o cambio de posición de los mismos. En todos los cambios de dirección de la línea, los postes deben ir empotrados en un macizo de hormigón, cualquiera que sea la naturaleza del terreno. En los trazados sobre vías de comunicación, de cada cinco postes, al menos uno debe ir empotrado en macizo de hormigón.

En los cruces con otras líneas eléctricas o con

vías de comunicación general, se colocan los postes, siempre que es posible, en terreno firme, fuera de rellenos o terrenos movedizos. Cumpliendo este requisito se aproximan los postes, lo más posible, a las márgenes de la vía que se trata de cruzar, a fin de reducir el vano de cruce a un mínimo y se sujetan sobre el terreno por un macizo de hormigón que asegure su estabilidad.

Cuando el poste es de material conductor y se apoya sobre edificio o construcción cualquiera, siendo la línea de alta o media tensión, debe dársele comunicación eléctrica con tierra.

Postes de madera. — El poste de madera (fig. 1.ª) fué el empleado en las primeras líneas eléctricas, telegráficas, telefónicas y aun de transmisión de energía, mientras no se emplearon las actuales tensiones.

El poste de madera es barato, en cuanto a precio de coste, pero está lleno de inconvenientes. No siendo fuerte, es preciso prodigarlo en la línea, y con él no se consienten vanos mayores de 35 metros.

No ofrece garantía de resistencia ante tempestades y vientos fuertes.

Su vida es corta, aun cuando se le robustezca con inyecciones antisépticas de sulfato de cobre, creosota, etc., y se proteja su superficie enterrada con carbonización o embreado.

Si bien hay postes que duran doce o quince años, los hay, en cambio, que se inutilizan al cabo de dos o tres solamente. Se calcula su vida media de siete a ocho años.

La substitución de postes inutilizados resulta cara por el precio de los mismos y por el movimiento de material y personal que ocasiona.

En telegrafía, cuya corriente es inofensiva, cuando las líneas cruzan terrenos despoblados y alejados de los caminos, se consigue gran economía

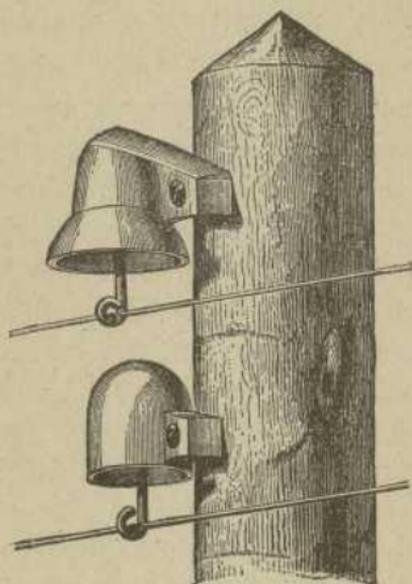


Fig. 1

rebajando los postes. Generalmente el poste podrido o apolillado, se corta por su línea de tierra, y la rebaja consiste en enterrar una nueva parte del resto del poste, aun cuando los conductores queden 70 u 80 centímetros más cerca del suelo.

Con tales condiciones del poste de madera, se comprende que su empleo se haya abolido en las grandes transmisiones de energía, cuyo servicio no

puede sufrir interrupción alguna, y haya quedado relegado a las redes secundarias o a las compañías de capital escaso, donde se sacrifica todo a la mayor economía.

Postes de hierro. — Para evitar en parte los inconvenientes del poste de madera, se ha recurrido al hierro laminado o fundido, sobre todo por las compañías ferroviarias, que aprovechan para sus líneas telegráficas, los carriles retirados de sus vías.

Los postes se reducen a simples carriles, cuyas secciones son en T o en U , embetunados en su parte baja, para evitar la oxidación, y clavados verticalmente.

En las líneas rectas, se emplea el poste en U sencillo; en las curvas y vértices de líneas poligonales, se emplean acoplados de dos en dos, unidos por los extremos de sus ramas, dejando entre ambos un espacio hueco cerrado. El conjunto tiene toda la consistencia de un tubo.

Estos postes resultan económicos cuando se utilizan para su formación los carriles retirados de la línea férrea. Son sencillos de construir y fáciles de armar de soportes para los aisladores. Pueden aceptarse para líneas ligeras, pero de ningún modo para líneas pesadas.

Observemos que su forma es perfectamente irracional desde el punto de vista mecánico; porque la sección de hierro es la misma en el empotramiento que en el vértice. Esto hace que, a igualdad de peso, sea mucho más resistente la torre de celosía que el poste de carril.

Consecuencia también de la sección uniforme del poste, es su escasa resistencia a los esfuerzos transversales, como son los fuertes vientos, que con relativa facilidad derriban las líneas. Convendrá, por lo tanto, que los mismos hilos sostengan en parte a los postes, y, para ello, se aconseja emplear postes reforzados, cada 400 ó 500 metros, aun en trayectos rectos de la línea.

Más perfecto que este poste de carriles, es el poste de fundición, representado en la figura 2.^a, que, merced a su forma de tubo troncocónico, ofrece gran resistencia y puede soportar líneas pesadas, por la calidad o por el número de sus hilos. El de la figura, soporta 24 hilos telefónicos.

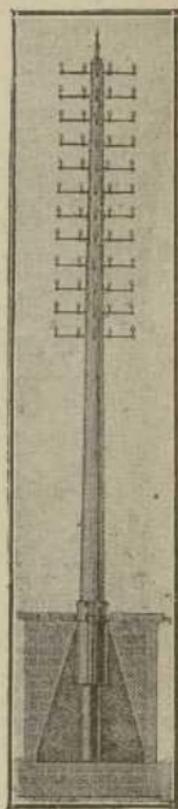


Fig. 2

Postes de cemento armado. — Un poste de cemento armado, es sencillamente una armadura formada por varillas ligeras de hierro, recubiertas de una masa de cemento.

Si el poste es sencillamente troncocónico, las varillas se disponen según las generatrices de este cuerpo geométrico, y se mantienen unidas mediante aros, decrecientes de la base al vértice.

La compañía española «L. B. S.» construye estos postes en forma de tubo, como puede verse en

la figura 3.^a, que representa un detalle de sus talleres de Madrid.

El poste hueco es relativamente ligero de peso; de resistencia suficiente para soportar líneas pesadas y aun para permitir que, sin diámetros exa-

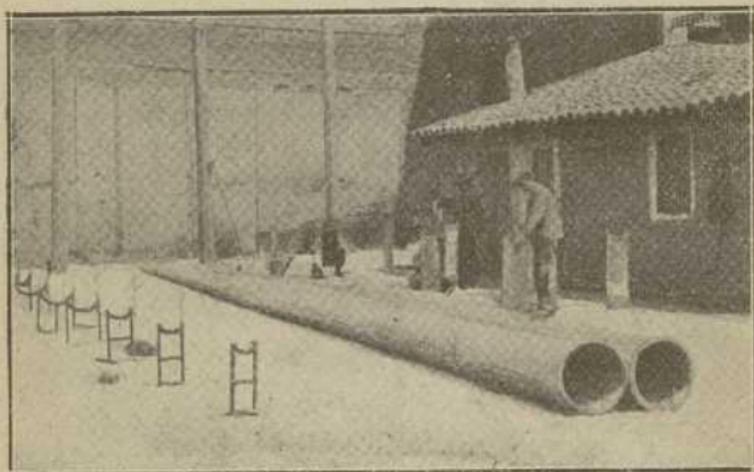


Fig. 3

gerados, puedan subir hasta su vértice los obreros encargados de remediar averías en la línea (fig. 4.^a).

El poste de cemento es inalterable por los agentes atmosféricos y no exige cuidado alguno para su conservación.

Su elasticidad es notabilísima, y la tracción de los hilos puede causarle grandes desvíos de la vertical, sin que su estructura se resienta en lo más mínimo. Su resistencia a la flexión y a la compresión puede aumentarse a voluntad, sin más que aumentar el número o la sección de las varillas

empleadas en la armadura.

Es claro que si tanta resistencia se exige al poste, podrá crecer su peso hasta el punto de hacerle económicamente inaceptable.

Estos postes de tal resistencia, que seguramente se exigirán en los vértices de las líneas, pueden substituirse por postes gemelos, acoplados como los postes de madera.

La colocación de un poste de cemento es en general tan sencilla como la de uno de madera. Generalmente, se clavan en el suelo sin construcción alguna, y sin más refuerzo que el de unas cuantas piedras rodeando a la cola del poste. Sólo en los ángulos se recibe el poste entre construcción que le asegura.

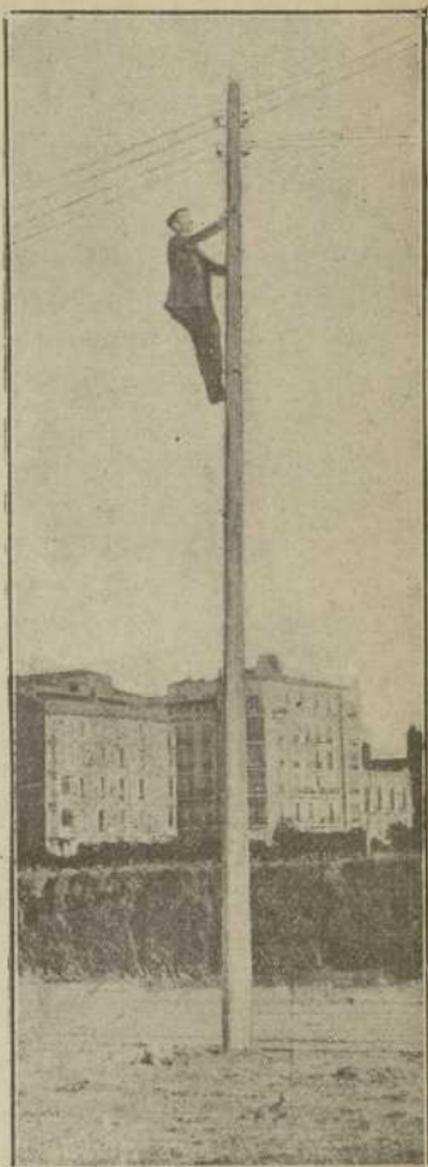


Fig. 4

La resistencia del poste de cemento permite, sobre todo en líneas rectas, vanos mucho mayores que con los postes de madera. Se llega fácilmente a los 100 metros y se encuentran líneas de esta clase que no contienen más de 14 ó 16 postes por kilómetro.

No están exentos de defectos los postes de cemento armado.

Si el cemento que cubre la armadura es frágil, y el poste tiene partes delgadas, puede suceder que un golpe fuerte, una pedrada por ejemplo, haga saltar el cemento y deje al desnudo las varillas de su armadura.

Otro inconveniente grave, es el peso. Un poste sencillo para línea telefónica, de 13 metros de largo, pesa 1300 kilogramos, siendo difícilísimo su transporte, por su peso y por las dificultades de moverlo.

Por fin, la lisura de su superficie, hace difícil el empleo de los trepadores para subir a su vértice.

Torres de celosías. — De todos los postes ensayados para la construcción de líneas eléctricas, el más acreditado y empleado hoy es la torre de celosía, formada por hierros en ángulo, cuidadosamente dispuestos para constituir un tronco de pirámide de máxima resistencia.

La figura 5.^a representa una de estas torres empleada por la compañía «Riegos y Fuerzas del Ebro» en su central de Sans (Barcelona), para recibir sus líneas de 100000 voltios y para las derivaciones a los pararrayos electrolíticos.

Las torres son sólidas de igual resistencia en todas sus secciones, desde la base de empotramiento hasta la cúspide. Esto indica que el hierro

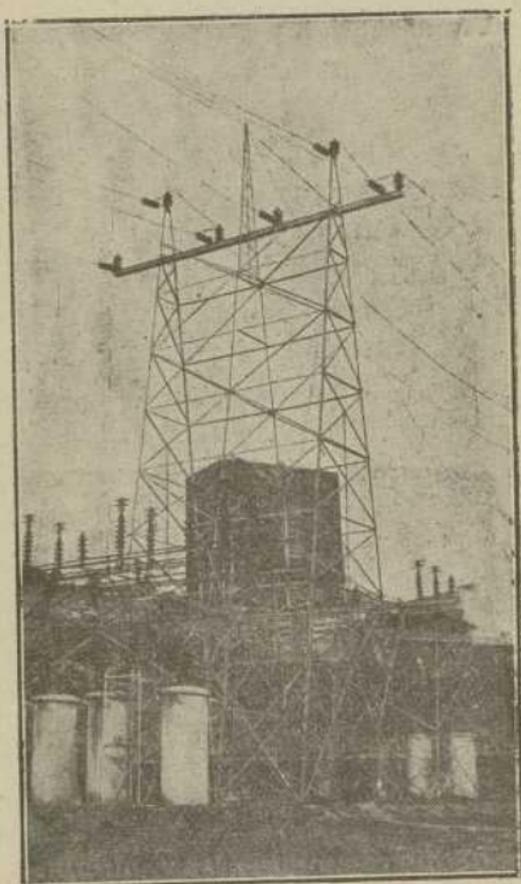


Fig. 5

gastado es mínimo y está racionalmente distribuido, con lo cual la torre resulta ligera y barata comparada con otros postes que ofrezcan la misma resistencia.

Su forma ofrece poquísimos blanco al viento y lo resiste perfectamente.

La torre se desmonta fácilmente y, por lo tanto, su transporte es cómodo.

Es fácil la ascensión a la parte alta, sin trepadores ni escalera, aprovechando los travesaños que forman sus celosías.

Durante su explotación exige el cuidado de repintarlo frecuentemente, para evitar la oxidación.

Es un inconveniente de la torre, su precio, que resulta elevado, por el material que contiene y por la mano de obra que requiere su construcción.

La colocación de la torre exige en primer lugar el alquitranado de su base, en toda la parte que va a quedar enterrada. Además, dado su total peso, es preciso cimentar suficientemente el sitio donde se va a apoyar, cubriéndolo todo con una cuidadosa construcción de cemento.

Soportes. — El aislador se sostiene en el poste por el intermedio de una pieza de hierro llamada soporte.

Cuando los postes son sencillamente de madera y la línea no lleva muchos hilos, los soportes son en forma de gancho, terminado en tirafondos (figura 6.^a, *a*), o en forma de Z (*b*), llevando en su extremo inferior dos taladros preparados para sujetarlos con tornillos al poste.

Si la línea lleva seis o más hilos, se emplean las crucetas, que son listones de madera inyectados, que se sujetan al poste en cruz con él, y sobre las cuales van los soportes rectos (fig. 6.^a, *c*).

Para los postes de cemento armado y torres de celosías existen diversos tipos de soportes.

El tipo Roizonne (fig. 7.^a) está constituido por una serie de crucetas paralelas, sujetas al poste por una anilla posterior, si son de cemento, o por roblones si son torres, y sujetas unas a otras, para

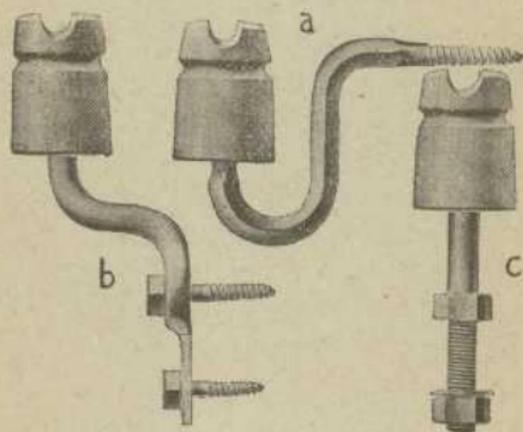


Fig. 6

conservarse en un mismo plano mediante un cuadro de hierro que les sirve también de guardahilos, es decir, que evita la caída al suelo de un hilo que accidentalmente se suelta de su aislador.

Se aumenta la solidez del soporte, cuando es de cemento, sujetando las crucetas a la parte anterior del poste mediante un tornillo que penetre en su masa de cemento. Esto es un defecto, porque los agujeros debilitan el poste. Además, dada la dificultad del taladro, será preferible hacerlos al moldear el poste.

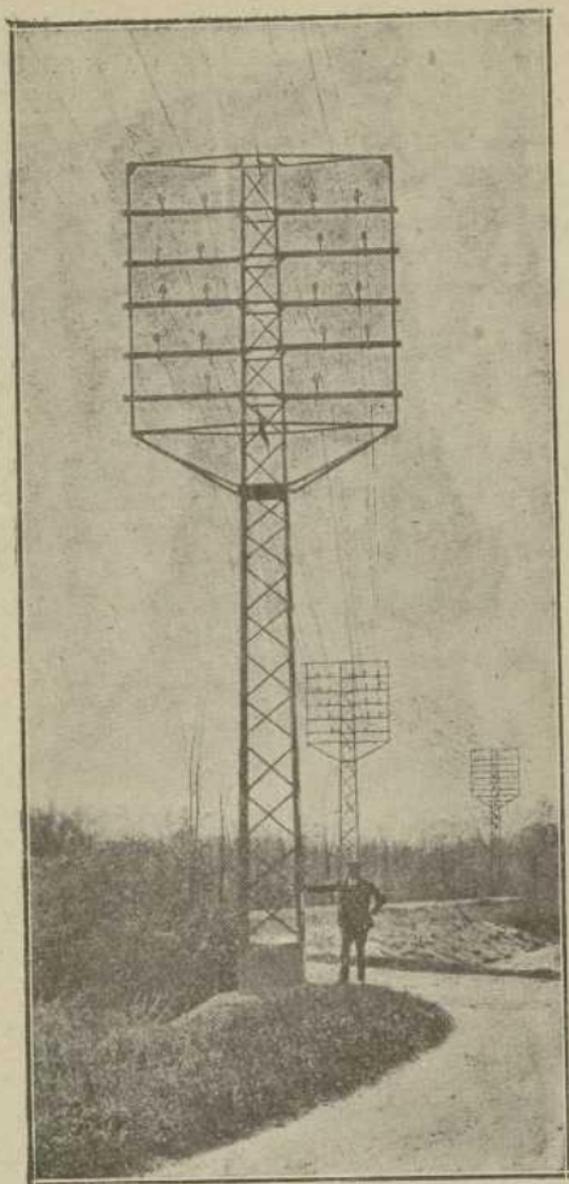


Fig. 7

Se consigue también una fuerte sujeción de las crucetas al poste cilíndrico mediante horquillas como la *M* (fig. 8.^a), que abracen el poste, que atraviesen la cruceta y que se ajusten mediante tuercas *P*, *Q*.

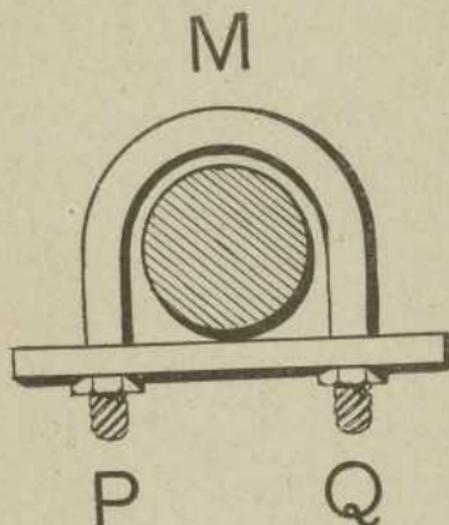


Fig. 8

Este tipo de soportes está especialmente indicado para líneas telefónicas de muchos hilos. Así los usa la «Compañía Peninsular de Teléfonos» de Barcelona.

En los soportes del tipo Gier (fig. 9.^a), las crucetas son prismas huecos formados por un hierro en *U*, cerrado por un hierro plano.

Se apoyan en una cara plana de la torre y se sujetan a ella mediante un roblón en el centro de la cruceta, y dos collares que abracen los hierros correspondientes a las aristas de la torre.

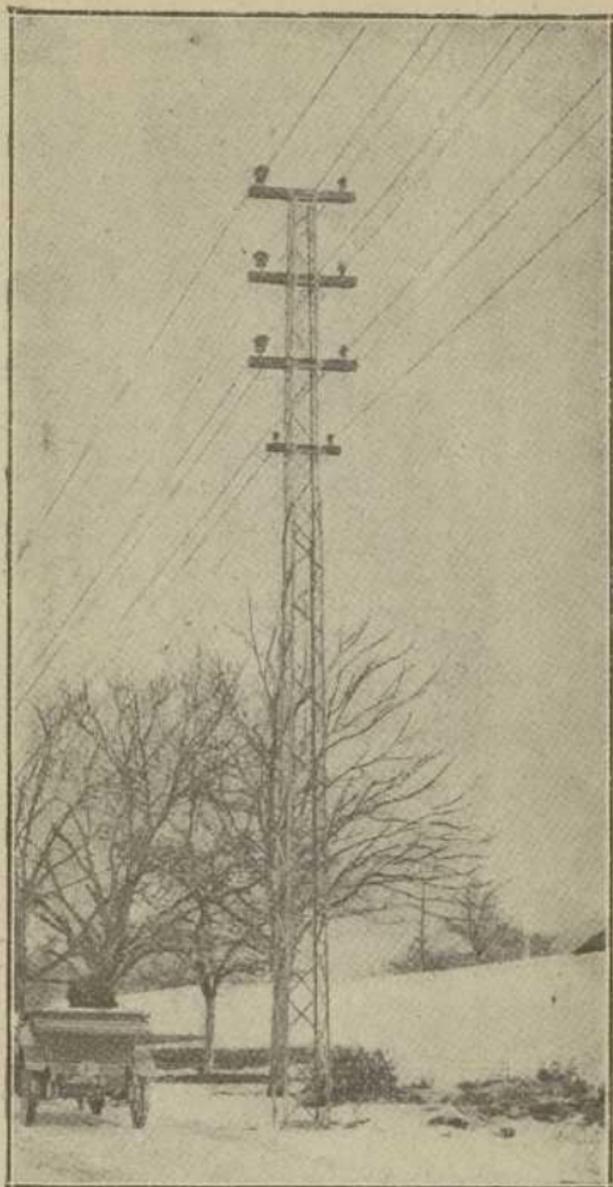


Fig. 9

Los aisladores se fijan a la cruceta, mediante hierros y tuercas como los del *c* de la figura 6.^a

Aisladores. — La elección de los aisladores es cosa de la mayor importancia, y tanto más, cuanto mayor sea la tensión que se va a emplear. Para las altas tensiones, todo cuidado es poco, teniendo en cuenta que unos malos aisladores pueden ocasionar grandes gastos durante la explotación, en forma de interrupciones del servicio.

El aislador está generalmente formado de porcelana, substancia que tiene gran resistividad y precio no muy elevado. Además, la superficie de la porcelana se esmalta fácilmente, consiguiéndose con ello que el polvo no se adhiera y que la lluvia la limpie.

La porcelana empleada para aisladores de alta tensión es casi siempre blanca, algunas veces de color. Siempre debe ser de grano finísimo y compacta. Se prueba esto último rompiendo un aislador y echando una gota de tinta sobre la sección: la tinta no debe extenderse.

El aislador no debe presentar ningún defecto ni raya sobre su superficie ni en el interior.

Cuando se tienen varias líneas sobre un mismo poste, es conveniente poner un color de aisladores en cada línea.

Para la telegrafía y telefonía, se emplean en Francia los aisladores de vidrio verdoso, más barato que la porcelana, aunque mucho más frágil.

En España se ensayaron con éxito unos aisladores contruídos con una pasta especial de madera,

ideados y patentados por el jefe de Telégrafos señor Herrero, que sin aumentar gran cosa la conductibilidad, comparados con los de porcelana, eran menos frágiles que éstos.

También se ensayan actualmente aisladores de celuloide, que si satisfacen completamente en cuanto a poca conductibilidad y fragilidad, tienen, en cambio, el inconveniente de arder con suma facilidad, lo cual dificulta su empleo cuando la línea está próxima a una vía férrea.

En telegrafía militar, suelen emplearse aisladores de ebonita, como menos frágiles que los de porcelana.

Sin embargo, la ebonita no es recomendable en líneas estables, porque retiene con facilidad la humedad y el polvo, acabando por hacerse rugosa y esponjosa.

Formas de aisladores. — Al estudiar la forma de un aislador, debe procurarse que el camino que pudiera seguir la corriente para pasar del hilo al soporte, sea lo más largo y estrecho posible; para esto, convendrían aisladores cilíndricos, de pequeño diámetro y gran altura. Además, el aislador debe tener siempre una parte de su superficie preservada de la lluvia, para conservar sus propiedades aisladoras cuando la parte exterior esté mojada.

La forma de campana, con la concavidad hacia abajo, cumple perfectamente ambas condiciones, y por eso se adopta exclusivamente.

El aislador de gancho está formado por una campana de porcelana, con dos orejas taladradas

que sirven para fijarle al poste (fig. 1.^a). En el interior va soldada una varilla de hierro terminada en un gancho, para sostener el conductor. Este aislador es económico pero inseguro.

Hoy día se emplea casi exclusivamente el aislador de retención (fig. 10). Está formado por una

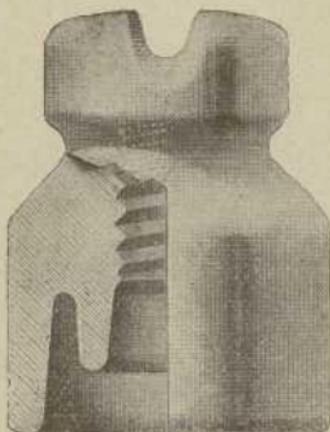


Fig. 10

o dos campanas concéntricas, en cuyo centro se suelda un soporte curvo de hierro, que sirve para fijarlo al poste. En la parte superior exterior, lleva una garganta, a la cual se arrolla el conductor de línea, o un hilo fino que retiene fuertemente la línea. Este último procedimiento da nombre al aislador y debe practicarse siempre al tender líneas, para que en el caso de rotura del conductor, quede retenido por los aisladores, evitando que la línea se afloje en grandes extensiones.

Para aumentar el aislamiento, se han empleado también los *aisladores con aceite* que se representan en sección en la figura 11.

El borde inferior de la campana de porcelana, está recurvado hasta constituir un depósito anular, que se llena de aceite, y que constituye una barrera para las derivaciones a tierra de la corriente.

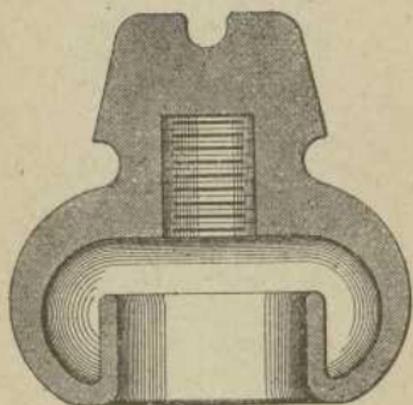


Fig. 11

Pero el líquido se solidifica prontamente gracias al polvo y a los insectos que llegan a él, y esto, unido a la dificultad de renovar el aceite, ha hecho abandonar este tipo de aisladores.

Al generalizarse las altas tensiones, se ha adoptado casi exclusivamente el aislador de campanas múltiples, cuya sección se ve en la figura 12. Este tipo contiene cuatro campanas, de las que cada una protege de la lluvia a todas las interiores. En su perfil se observa una ranura para el conductor

en la parte más alta, y dos cinturas para atar el hilo de retención.

Es claro que la profundidad de las campanas, su número y la masa de porcelana del aislador crecen con la tensión de la línea en que se van a instalar.

Esto obliga, para las más elevadas tensiones, a construir aisladores de tamaños tan exagerados

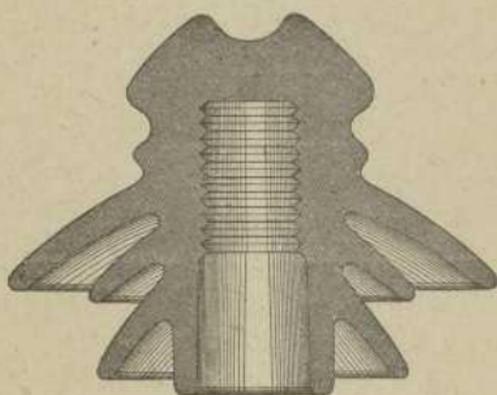


Fig. 12

que presentan dificultades insuperables de ejecución y obligan a formarlos de diversas piezas. De éstos es el aislador representado en la figura 13.

Para evitar estos inconvenientes, se han ideado los aisladores en serie (fig. 14) compuestos de piezas sueltas, que se empalman en serie, en mayor o menor número, según la tensión que deban resistir.

El tipo *A* es una serie de platos de porcelana, con armaduras de hierro galvanizado, para ensartarlos unos en otros.

Los platillos tienen en sus dos caras una serie de canales concéntricos, con objeto de alargar el camino del soporte al conductor. Pero los canales de la cara superior, al llenarse de agua durante las lluvias, son perjudiciales más bien que convenientes.

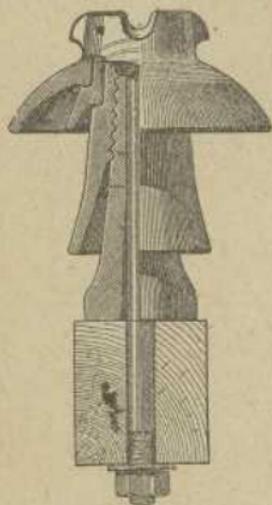


Fig. 13

En el tipo *B*, los platos conservan acanalada su cara inferior, pero lisa su cara superior.

En el tipo *C*, cada una de las piezas componentes tiene sus campanas tan profundas como los aisladores de una sola pieza.

La «Compañía Catalana» tiene en sus líneas de 130000 voltios, los aisladores Delta del tipo *A*. La «Energía Eléctrica de Cataluña» tiene el tipo *B* en sus líneas de 100000.

Aisladores blindados y coloreados. — En las líneas telegráficas y telefónicas los aisladores de porcelana son rotos muchas veces por los viandantes, que encuentran en ellos un buen blanco para sus pedradas o tiros.

En las regiones que existe esta costumbre, signo de poca cultura, ocasiona gastos cuantiosos al Estado o a los particulares la reposición de los aisladores destruidos; y tratando de evitar estos perjuicios, se han construido aisladores blindados.

El blindaje se reduce a una campana de fundición que recubre la campana de porcelana.

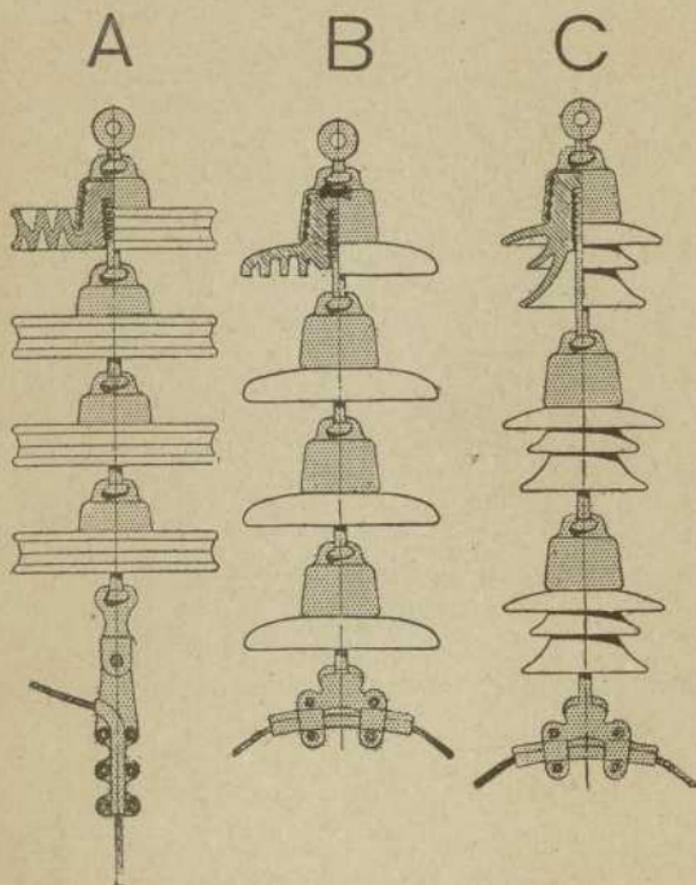


Fig. 14

El aislador gana en cualidades, porque la porcelana resulta protegida del polvo por el blindaje, pero, en cambio, pierde, porque la lluvia no puede lavarle como cuando está desnudo.

El aislador blindado resulta pesado y costoso.

También se ha procurado hacer menos llamativo el aislador, dándole un color parecido al de la madera que forma el poste, o bien un azul intenso como el del cielo; y, en efecto, algo se ha conseguido: han disminuído de un modo notable el número de aisladores rotos.

Ensayo de aisladores. — Los ensayos de los aisladores se efectúan generalmente en la fábrica misma, en cuanto se construyen, y alguna vez se reconocen nuevamente al recibirlos el cliente.

En España poseemos una importantísima fábrica de porcelana para la electricidad, dirigida por el ingeniero español don Luis Berenguer, en Barcelona, dotada de un completo laboratorio, donde un transformador muy bien estudiado puede producir hasta 30000 voltios de tensión.

Generalmente los aisladores destinados a tensiones inferiores a los 20000 voltios, se ensayan a cuádruple tensión de la normal, y para tensiones superiores a los 20000 la tensión de ensayo se limita al triple.

Cuando los aisladores se forman de varias piezas, como el de la figura 13, se ensayan separadamente cada una de las piezas componentes, al doble de la tensión de servicio, y el aislador completo al triple.

Ensayos industriales. — El señor Berenguer ha publicado un folleto conteniendo interesantes descripciones de su laboratorio y de sus métodos de

ensayo. De este libro entresacamos los párrafos siguientes, únicos que pueden interesar en un estudio tan elemental como el que hacemos de este asunto.

«De todos los ensayos eléctricos que se practican en el laboratorio, el ensayo de resistencia de aislamiento a la tensión es el más importante y práctico y el que más puede interesar al comprador, ya que es en definitiva el que garantiza la bondad de los aisladores. Se practica del modo siguiente:

»Los aisladores se colocan dentro de una cubeta soportados por planchas de madera que presentan unos agujeros circulares de diámetro apropiado al tamaño y forma del aislador que se desea probar; dentro de cada agujero se coloca el aislador correspondiente con la cabeza hacia abajo y se echa agua en la cubeta hasta cubrir el cuello del aislador, que queda de este modo en contacto con uno de los polos de alta tensión por el lugar mismo por donde sostiene el conductor. La comunicación con el otro polo se obtiene mediante cadenas que penden de un marco o bastidor suspendido encima de las cubetas, las cuales penetran en el agujero del aislador destinado al soporte, que previamente se ha llenado de agua. De este modo se ofrece a la corriente una gran superficie de contacto, y si hay defectos, especialmente poros o pequeñas grietas, que en general y por experiencia se sabe que se presentan particularmente en la cabeza, el agua filtrándose por ellos ofrecerá con su buena conductibilidad paso fácil a la corriente y se producirá una descarga o perforación mucho más fácilmente

que entre el conductor colocado en la garganta y el soporte roscado en su agujero, tal como funcionan en la práctica y a los que substituye ventajosamente, para el objeto propuesto, la disposición adoptada.

»Colocados así los aisladores, y asegurados de que en el local de ensayos los polos de alta tensión están bien conectados con la cubeta y el bastidor respectivamente, y que nada hay que pueda perjudicar el aislamiento de estos aparatos, se procede a efectuar en el transformador las conexiones necesarias para la obtención de la tensión máxima que se desea y a fijar las distancias debidas entre los bornes de alta tensión y las bolas del chispómetro.

»Cerrada la puerta del local del transformador, todo está dispuesto para la marcha.

»Asegurados, por una inspección del cuadro de distribución, que los interruptores bipolares y de máxima están desconectados, que la manivela del divisor de potencial está en el contacto cero y que la resistencia de arranque del motor y el reóstato de excitación del generador están en sus puntos muertos, se pone en marcha el grupo convertidor cerrando el interruptor bipolar de la corriente continua de la red general y regulando gradual y paulatinamente la resistencia de arranque del motor hasta su último contacto.

»Después se conectan el disyuntor de máxima de excitación, el interruptor bipolar del circuito del generador y el disyuntor de máxima de la corriente alterna primaria; es muy conveniente y en nuestro laboratorio se tiene esta precaución, asegurarse

todos los días a la primera puesta en marcha que los dos disyuntores de máxima funcionan sin dificultad. Luego se excita el generador por medio del regulador magnético hasta que su voltímetro marque la tensión que se necesita y por medio del divisor de potencial se envía al transformador la corriente alterna primaria a un voltaje apropiado al correlativo correspondiente que se desea en la corriente secundaria.

»Obtenida así la tensión deseada, se envía a los aisladores sometidos a ensayo en las cubetas por espacio de media hora, al cabo de la cual, si no ha ocurrido incidente alguno, se da la prueba por terminada, y si se ha presentado algún aislador defectuoso, se procede a su eliminación y se continúa otra vez el ensayo durante otra media hora seguida. Se ha fijado en media hora la duración de cada ensayo, manteniendo constantemente durante el mismo la tensión al límite fijado por cada tipo, porque la práctica ha enseñado que los aisladores defectuosos no se perforan inmediatamente, sino que necesitan para ello un cierto tiempo, generalmente menor de quince minutos; y como los que han resistido victoriosamente durante un cuarto de hora de estar sometidos a tensión, muy difícil y raramente son perforados después, resulta que los que salen de nuestro laboratorio sometidos a media hora de prueba, llevan toda garantía de bondad.

»En el caso que entre los aisladores sometidos a prueba haya alguno defectuoso, al ser perforado se produce un corto circuito en la alta tensión, puesto que los bornes secundarios puede decirse que están

entonces unidos directamente sin resistencia intermedia; y como la intensidad en el primario aumenta, el automático de máxima rompe el circuito y debe procederse a la eliminación del aislador defectuoso para proseguir el ensayo con los restantes. Para proceder a esa eliminación, precisa saber cuál sea, entre todos los sometidos a prueba, el aislador defectuoso; y esa determinación es cosa algo difícil y que sólo se aprende con la práctica; únicamente después de muchos ensayos y observaciones durante las pruebas, llegan a conocerse con facilidad y rapidez.

»Para ello se procede del modo siguiente: Tan pronto como se desconecta el disyuntor se pone la manivela del reóstato en la posición de abierto, se conecta el automático de máxima y se excita nuevamente el generador de una manera lenta; según sea la avería del aislador, éste presentará fenómenos y aspectos más o menos característicos, pero que en definitiva entrarán dentro de alguno de los tres casos típicos que pueden presentarse y que se reconocen del modo siguiente: 1.º, el aislador está sensiblemente perforado; en este caso, como apenas ofrece resistencia, al regular sube rápidamente la intensidad de la corriente, mientras la tensión apenas se manifiesta; 2.º, el aislador tiene una ligera avería; en este caso, como opone todavía al paso de la corriente una cierta resistencia, la intensidad va aumentando gradualmente al par que la tensión hasta un cierto límite, en que se produce nuevamente otra descarga de perforación; 3.º, el aislador está casi intacto; en este caso, es tan considerable

la resistencia que ofrece todavía a la corriente, que es posible llegar con la tensión hasta muy cerca del valor normal de prueba sin que sobrevenga descarga alguna, o hasta aquel mismo valor, presentándose a los pocos segundos otra descarga. Este es el caso más corriente que se presenta en la práctica dentro de una gran variedad y amplitud de fenómenos; y según sean la calidad y propiedades de la porcelana que se ensaya, estas descargas pueden repetirse varias veces antes que el aislador pueda considerarse comprendido en alguno de los casos 1.º ó 2.º descritos.

»De aquí emana la dificultad de determinarlo, ya que no ofrece señal aparente de avería; y, por esto, y a fin de servir como auxiliar de la práctica que el operador tenga en distinguirlo, es conveniente emplear algún sistema que le obligue a proceder en la eliminación con orden y seguridad.

»Terminado el ensayo, se quita la excitación, se desconectan los dos automáticos de máxima y el interruptor bipolar de la corriente alterna, se pone la manivela del divisor de potencial sobre el contacto cero, se quita con la resistencia de arranque la corriente al motor y se desconecta el interruptor bipolar de la corriente continua.

»Para la prueba con lluvia, están naturalmente dispuestos de otro modo los apoyos para los aisladores; en este ensayo, la disposición es completamente idéntica a los casos de la práctica, estando los soportes atornillados a sólidas llantas de hierro que descansan sobre la cubeta y enchufados en los agujeros de los aisladores que se hallan así coloca-

dos cabeza arriba y reunidas sus gargantas por medio de hilos de cobre que comunican con el otro polo. En esta disposición, se hace funcionar el aparato de lluvia, graduando al grado que se dessee su intensidad; se da la corriente y se efectúan con lluvia, y de idéntica manera los mismos ensayos que se han descrito sin lluvia.

»En el laboratorio, a más de los aisladores, se ensayan también los otros artículos de porcelana destinados a la electricidad, tales como mangos, tubos de entrada rectos y curvos, etc. Para este objeto, existen electrodos especiales que permiten colocar las piezas que se quieren ensayar, en condiciones idénticas a aquellas en que han de trabajar en la práctica; y algunos de estos ensayos deben ser hechos con aceite, para evitar descargas entre la parte exterior e interior de los aisladores o la formación de chispas cuando se trata de ensayar pequeñas piezas aislantes.

»Tales son las operaciones que constituyen los ensayos corrientes o industriales.»

Proyecto de una línea eléctrica. — Cuando se trata de proyectar una línea eléctrica, ante todo debe recorrerse detenidamente el trayecto por donde la línea se va a construir, tomando nota detallada de todos los accidentes que puedan influir en la construcción.

Para que el transporte de materiales sea fácil y económico, conviene que las líneas vayan próximas a las carreteras y vías férreas; pero, en cambio,

para economizar material, conviene mucho más la línea recta.

Cuando se trate de líneas telegráficas o telefónicas, se prefiere siempre instalar la línea en el borde de las vías de comunicación, con lo cual se facilita el transporte de material, la vigilancia y el remedio de averías muy frecuentes en esta clase de líneas.

La línea resulta mucho más larga si se han de seguir todas las curvas del camino, pero el material de línea es relativamente económico; y se tolera este inconveniente a cambio de las ventajas señaladas anteriormente.

Cuando se trata de líneas eléctricas para la transmisión de energía, se prefiere instalarlas siguiendo la recta, siempre que sea posible. La instalación será así algo más penosa por separarnos de las vías de comunicación; pero, en cambio, ahorraremos mucho material de línea, que siempre es muy costoso en esta clase de transmisiones. Por otra parte, estas construcciones se hacen con gran esmero, y, por lo tanto, las averías, durante la explotación, son menos frecuentes que en las de telegrafía y telefonía.

Las líneas que marchan por las orillas de los caminos, deben instalarse siempre a un mismo lado de éstos. Si podemos escoger libremente un borde u otro, escogeremos el que tenga más curvas cóncavas, porque en las curvas convexas, si son de poco radio, los hilos se meten en el camino proyectándose sobre los carros y pudiendo ser alcanzados por éstos cuando llevan cargas voluminosas. Esto se evita multiplicando los postes en los bordes con-

vexos o poniéndolos de gran altura, pero ambas soluciones son costosas.

Cuando las sinuosidades del camino son muy frecuentes, como sucede en las carreteras que suben a las sierras, la línea eléctrica no debe seguir exactamente las curvas, sino separarse de ellas para conseguir tramos rectos, aunque procurando que desde la carretera se vea todo el trazado.

Las líneas eléctricas no deben ir nunca cerca de los árboles ni de caídas de agua que puedan tocar ni humedecer los conductores.

En terrenos quebrados, se evitará cuidadosamente el colocar un poste mucho más bajo que sus dos colaterales, para impedir que los hilos tiren hacia arriba del poste intermedio.

Trazado y determinación de una línea eléctrica.—

Decidido el camino más conveniente que la línea eléctrica ha de seguir, se procede a su trazado, plantando piquetes en los sitios que han de ocupar los postes.

La distancia de poste a poste se determina por reglas especiales de la Electrotecnia y de la Mecánica, y la dirección del trazado será: o el borde de un camino, o una línea recta trazada con los procedimientos señalados para las alineaciones.

Una línea de transmisión eléctrica es exactamente una línea geométrica poligonal, teniendo por vértices los pies de los postes y por lados la proyección de los conductores sobre el suelo. Los ángulos interiores de esta línea poligonal no pueden, en ningún caso, ser menores de 60° sexagesimales.

La determinación topográfica se verifica por el método del recorrido.

Plano parcelario. — Generalmente, cuando se trata de levantar el plano de una línea eléctrica establecida, lo mismo que cuando se trata de establecerla, interesa conocer las quebraduras del terreno que la línea atraviesa, clases de cultivos en las proximidades de las líneas, construcciones, etc., etc., bien sea para hacernos cargo de la dificultades que ofrecerá su vigilancia, conservación y reparación, cuando esté instalada, o bien para calcular la cuantía de las indemnizaciones que deberán satisfacerse a los propietarios afectados por la línea, dificultades de arrastre del material y demás gastos, cuando se proyecta.

Para llenar este objeto, se representa en el plano la línea eléctrica y todas las parcelas interesadas por la línea, constituyéndose así un *plano parcelario*, en el que además se marca la situación de todas las instalaciones eléctricas afectadas por la línea y las otras instalaciones que estuviesen en su zona de influencia, cruzándose o que vayan paralelas a menos de 25 metros.

Para el levantamiento de un plano parcelario se toma como polígono de referencia la línea eléctrica misma construída o proyectada.

El plano parcelario se completa con planos de detalles de las disposiciones que han de adoptarse en los cruces con otras líneas y en las ocupaciones de vías de servicio general y terrenos de dominio público.

Dibujo del plano topográfico. Escalas. — Después de realizadas todas las operaciones de campo, mediciones de líneas y de ángulos, croquis, notas, etc., etcétera, debe dibujarse sobre el papel la proyección horizontal del terreno estudiado; es decir, debe trazarse el plano levantado, constituyendo esta operación el *trabajo de gabinete* del topógrafo.

La figura trazada debe ser semejante a la proyección del terreno: y la razón de semejanza, perfectamente definida y generalmente sencilla, es lo que se llama *escala del plano*.

La escala se representa por una fracción ordinaria o decimal, cuyo numerador es la dimensión del dibujo y cuyo denominador es la dimensión correspondiente del terreno. Así, cuando se escribe «Escala 1 : 25» o «Escala 0'02», quiere decir que cada unidad de longitud del dibujo representa 25 unidades del terreno, o cada dos unidades del dibujo, cien del terreno. De manera, que las medidas tomadas en el campo, deben multiplicarse por la fracción que representa la escala, para tener la dimensión del dibujo, y recíprocamente, una dimensión del dibujo debe dividirse por la fracción de la escala para conocer la dimensión del campo.

La fracción de escala se fija tanto más pequeña cuanto mayor es la extensión que debe representarse, y tanto mayor cuanto más claridad y detalle pretendemos dar al dibujo.

Cuando los planos han de ser presentados a la Dirección de Obras públicas, se exige que la escala sea tal, que resulten los planos manejables e inteligibles en todas sus partes: el plano parcelario en

escala lo más de 1 : 5000, y los planos de detalles en escalas suficientes para dar dibujos inteligibles en todos sus detalles.

Escala gráfica. — La escala gráfica es una línea recta dividida en partes iguales, con indicación de las unidades representadas por cada una de estas partes. La primera división suele dividirse a su vez en submúltiplos de la unidad adoptada. Por ejemplo, si las divisiones principales de la escala representan kilómetros, dividiremos el primer kilómetro en diez partes iguales que representarán hectómetros.

Esta escala se dibuja en el mismo papel del plano, para dar idea de la magnitud del terreno representado. Pero cuando se estudia un plano para proyectar o presentar una obra cualquiera, es más cómodo copiar la escala gráfica en el borde de un papel suelto, que puede aplicarse libremente sobre un detalle cualquiera del dibujo, constituyendo así una *escala volante*.

CAPÍTULO II

LÍNEAS PARA CORRIENTE CONTINUA

Cálculo de conductores. — La elección acertada de un conductor, exige dos cálculos distintos. El primero, llamado *cálculo eléctrico*, sirve para fijar la sección metálica útil, independientemente de sus cubiertas protectoras, si las tiene, atendiendo únicamente a sus condiciones de conductibilidad. El segundo, llamado *cálculo mecánico*, sirve para comprobar o determinar las condiciones en que el conductor está instalado, o lo estará en la línea que se proyecta, asegurando que sus condiciones mecánicas resistirán los esfuerzos a que quede sometido durante su servicio, tracción, peso, cargas extraordinarias, etc., etc.

En este capítulo vamos a estudiar el cálculo eléctrico, dejando para el capítulo IV el cálculo mecánico.

La sección de los conductores para una línea se efectúa, según las circunstancias en que se proyecta, atendiendo a una de las tres condiciones siguientes.

Puede exigirse al conductor que su temperatura no exceda de cierto límite máximo. Tal sería, por

ejemplo, el caso en que el conductor estuviera instalado en un almacén de substancias inflamables o productos explosivos.

Si la temperatura es la única condición impuesta, la sección se calcula aproximadamente por *densidad de corriente*, es decir, fijando previamente el número de amperios que pueden circular por cada milímetro cuadrado de metal.

Se calcula con mayor exactitud, por la fórmula de Joule (tomo I, página 103), tal como se han calculado los conductores resistentes para reguladores (tomo X).

Cuando se trata de líneas largas, es importante, en la mayoría de los casos, asegurar en su extremo una tensión no muy inferior a la tensión en su arranque. Por ejemplo, si una tensión de 110 voltios se va a transmitir por una línea larga para alimentar bombillas de incandescencia, la caída de tensión consiguiente a la resistencia de la línea, hará que al final no lleguen los 110 voltios y, como consecuencia, que las bombillas permanezcan con sus filamentos rojos y no blancos, como corresponde a su luz debida.

Cuando pueda temerse este efecto, se calcula la sección del conductor atendiendo a la *caída de potencial* (tomo I, pág. 98).

Es claro que perder V voltios en línea, cuando por ella circulan I amperios, es perder W vatios.

$$W = V I$$

y, por lo tanto, es perder dinero.

Cuando la corriente no es barata, y esto sucede

siempre que se obtiene quemando carbón, puede dudarse al proyectar la línea, entre gastar cobre en exceso al instalarla o gastar vatios durante la explotación.

Se calcula entonces la sección del conductor, procurando que sea lo menor posible la suma de gastos de cobre y de vatios, es decir, se calcula entonces atendiendo a la *mayor economía*.

Estudiaremos sucesivamente cada uno de los métodos: *densidad de corriente*, *efecto Joule*, *caída de potencial* y *mayor economía*.

Al proyectar, deberán tenerse en cuenta las posibles ampliaciones de la canalización, la poca exactitud de la resistividad de los cobres empleados, y aun la posible variación de esta constante con el tiempo. Por todo ello, preferimos emplear para el cobre el coeficiente de resistividad $\rho = 0'02$, algo superior al que dan los formularios, y al que hemos dado nosotros mismos en el tomo I, página 89.

Densidad de corriente. — El procedimiento más sencillo, aunque menos exacto, para calcular conductores, y el único empleado por instaladores poco instruídos, consiste en admitir cierto número de amperios δ , por cada milímetro cuadrado de cobre, y calcular la sección s por fórmula

$$s = \frac{I}{\delta} \quad \text{ó} \quad I = \delta s \quad [1]$$

Si se quiere conocer el conductor por su diámetro d , emplearemos las fórmulas

$$d = 1'128 \sqrt{\frac{I}{\delta}} \quad \text{ó} \quad I = 0'788 \delta d^2 \quad [2]$$

El reglamento para instalaciones eléctricas, vigente en España, señala las siguientes cifras para la densidad:

Conductores desnudos

Sección	Canalizaciones en local cerrado	Canalizaciones al aire libre
2 mm ²	6'00	9'25
4 »	5'00	8'50
6 »	4'50	7'75
8 »	4'00	7'25
10 »	3'75	6'75
12 »	3'60	6'25
15 »	3'50	5'90
20 »	3'35	5'50
25 »	3'20	5'25
30 »	3'00	5'00
40 »	2'75	4'75
50 »	2'50	4'50
60 »	2'35	4'25
70 »	2'25	4'00
85 »	2'10	3'75
100 »	2'00	3'60

† En conductores con régimen de corriente variable, por debajo del máximo, los valores anteriores pueden ser aumentados hasta un 20 por 100.

En los conductores desnudos de mayor sección, montados sobre soportes incombustibles, la densidad de corriente está limitada solamente por la

condición de que la elevación de temperatura no resulte perjudicial para el conductor, las personas ni los objetos próximos al mismo.

Hilos y cables cubiertos en canalizaciones aéreas

Sección	Densidad máxima
2 mm ²	6'00
4 »	5'00
6 »	4'50
8 »	4'00
10 »	3'75
12 »	3'60
15 »	3'50
20 »	3'35
25 »	3'20
30 »	3'00
40 »	2'75
50 »	2'50
60 »	2'35
70 »	2'25
85 »	2'10
100 »	2'00
120 »	1'85
150 »	1'75
185 »	1'60
240 »	1'50
300 »	1'40
400 »	1'25
500 »	1'18
650 »	1'10
850 »	1'05
1000 »	1'00

Como en los conductores desnudos, pueden aumentarse estos valores en la misma proporción cuando el régimen de corriente es muy variable.

Cables subterráneos de un solo conductor para corriente continua

Sección	Densidad máxima
15 mm ²	8'00
25 »	6'80
35 »	6'00
50 »	5'20
70 »	4'50
100 »	4'00
125 »	3'70
150 »	3'40
200 »	3'00
250 »	2'75
300 »	2'50
400 »	2'25
500 »	2'05
650 »	1'90
800 »	1'75
1000 »	1'60

Cables subterráneos de varios conductores

Secciones mm. ²	Número de conductores			Concéntricos	
	2	3	4	2	3
10	7'00	6'50	5'70	7'00	5'50
16	5'90	5'30	4'70	5'60	4'70
25	5'00	4'40	4'00	4'80	4'00
35	4'30	3'80	3'40	4'10	3'40
50	3'80	3'30	3'00	3'60	3'00
70	3'30	2'85	2'65	3'10	2'60
100	2'90	2'60	2'30	2'80	2'30
125	2'60	2'25	2'00	2'65	2'10
150	2'40	2'10	1'90	2'40	1'95
200	2'15	1'90	1'75	2'15	1'75
250	1'95	1'75	1'55	1'95	1'60
300	1'75	1'60	1'40	1'75	1'45
400	1'60	1'40	1'25	1'60	1'30

En los cables subterráneos de más de 3000 voltios se reducen los valores anteriores en un 10 por 100.

En el caso de que varios cables vayan juntos, se reducen a un 75 por 100 las densidades admisibles en todos los tipos de cables enunciados.

Todos los números anteriores se refieren al cobre, por ser éste el metal más empleado para los conductores eléctricos. Si se emplease otro metal distinto, los nuevos diámetros comparados con los del cobre, deben ser proporcionales a las raíces cúbicas de sus resistividades; es decir, que siendo ρ y d la resistividad del cobre y su diámetro, y ρ' y d' las mismas constantes de otro metal, debe cumplirse la condición

$$\frac{\rho}{\rho'} = \frac{d^3}{d'^3} \quad \text{ó} \quad \frac{d}{d'} = \sqrt[3]{\frac{\rho}{\rho'}} \quad [3]$$

EJEMPLOS NUMÉRICOS. — 1.º *Calcular un conductor de cobre para alimentar dos lámparas Nitra de 600 bujías y cinco de 50.*

El total de bujías que deben producirse es 1450, que, empleando lámparas Nitra, consumen 725 vatios. Si la tensión de servicio es de 100 voltios, los 725 vatios suponen $725 : 100 = 7'25$ amperios.

Fijemos la densidad de corriente en 2 amperios por milímetro cuadrado, y la fórmula [1] nos dará la sección

$$s = \frac{7'25}{2} = 3'6 \text{ mm}^2$$

si preferimos conocer el diámetro, emplearemos la fórmula [2]:

$$d = 1'128 \sqrt{\frac{7'25}{2}} = 2'1 \text{ mm.}$$

2.º Un conductor de cobre de 2 mm. de diámetro y con una resistividad $\rho = 0'02$, se desea substituir por un conductor de aluminio cuya resistividad es $\rho' = 0'03$.

¿Cuál debe ser el diámetro del nuevo conductor, para que se funcione en las mismas condiciones de intensidad y temperatura?

Aplicando valores numéricos a la segunda de las fórmulas [3], tendremos

$$\frac{2}{d'} = \sqrt[3]{\frac{0'02}{0'03}}$$

de esta proporción se deduce

$$d' = 2 \sqrt[3]{\frac{3}{2}} = 2 \times 1'14 = 2'28 \text{ mm.}$$

Calentamiento de conductores. — Un cuerpo caliente pierde su calor por radiación, por conducción y por convección. *Radiación* es la transmisión del calor a distancia siguiendo las mismas leyes que la luz. *Conducción* es la transmisión del calor del cuerpo caliente, a los sólidos que le tocan. *Convección* es la transmisión del calor que posee el cuerpo caliente, a los flúidos que le rodean y que se renuevan precisamente por la temperatura que adquieren.

Un conductor alcanza el régimen estable de temperatura, cuando la cantidad de calor que recibe por efecto Joule, es igual a la cantidad de calor que pierde por radiación, conducción y convección.

Un cuerpo sometido a todos los efectos anteriores y mantenido en un ambiente de temperatura t , alcanza una temperatura estable T , siendo la diferencia de temperaturas

$$T - t = 0'0973 \frac{\rho I^2}{K d^3}. \quad [4]$$

En esta fórmula, ρ es la resistividad del metal; I la intensidad que circula; K un coeficiente de proporcionalidad, propio de cada conductor, según el metal de que esté formado, el estado de su superficie, sus cubiertas, estado del aire, etc., etc., y d el diámetro del conductor.

Si se quiere expresar en función de la densidad de corriente, tendremos:

$$T - t = 0'06 \frac{\rho}{K} \delta^2 d.$$

Estas fórmulas nos hacen ver cómo cambia la temperatura de un conductor cuando cambia su constitución (ρ), su estado (K), sus dimensiones (s , d), la corriente que le recorre (I) y la densidad admitida (δ).

Cualquiera de estas fórmulas nos servirá para determinar el valor de K que corresponde a un hilo dado, instalado en determinadas condiciones, sin más que medir directamente $T - t$. Esta obser-

vación de temperatura, exige solamente algunos minutos cuando el hilo está desnudo y debe durar una hora, al menos, cuando está aislado.

Para estas determinaciones, emplearemos una de las fórmulas

$$K = 0'0973 \frac{\rho I^2}{(T-t) d^3} \quad [6]$$

$$K = 0'06 \frac{\rho \delta^2 d}{T-t} \quad [7]$$

EJEMPLO 1.º *Por un hilo de cobre de 2 milímetros de diámetro aislado con dos capas de algodón, pasan 4 amperios por milímetro de sección y alcanza una temperatura estable de 25 grados sobre el ambiente. En estas condiciones, ¿cuál es el coeficiente K propio del conductor?*

La fórmula [7] nos dará:

$$K = 0'06 \frac{0'02 \times 4^2 \times 2}{25} = 0'0015$$

Determinado el valor de K para los conductores de cobre de estas condiciones de aislamiento e instalación, pueden resolverse los problemas sobre calentamiento de conductores, contenidos en las fórmulas [4] y [5].

EJEMPLO 2.º *Por el mismo conductor del ejemplo anterior, van a circular 25 amperios, ¿qué temperaturas alcanzará sobre el ambiente?*

Conociendo el valor de K , podemos aplicar la fórmula [4] que nos dará:

$$T-t = 0'0973 \frac{0'02 \times 25^2}{0'0015 \times d^3} = 101$$

Cálculo de conductores por efecto Joule. — La fórmula [4] puede escribirse de este modo:

$$\frac{I^2}{d^3} = \frac{K(T-t)}{0'0973 \rho} \quad \text{o} \quad \frac{d^3}{I^2} = \frac{0'0973 \rho}{K(T-t)}$$

Para conductores del mismo metal, en iguales condiciones de instalación y de aislamiento, y consintiendo la misma elevación de temperatura, serán constantes los segundos miembros de las igualdades anteriores; llamándoles respectivamente a^2 y b^3 , tendremos:

$$\frac{I^2}{d^3} = a^2 \quad \frac{d^3}{I^2} = b^3$$

de donde se deducen las fórmulas

$$[8] \quad I = a \sqrt{d^3} \quad d = b \sqrt[3]{I^2} \quad [9]$$

Los coeficientes a y b se hallan experimentalmente como se halló el de K . Admitiendo $T - t = 10^0$ y expresando d en mm., se obtiene:

Para hilos aéreos	$a = 8$	$b = 0'25$
Para canalizaciones interiores	$4'5$	$0'36$
Para hilos en tubo	$4'3$	$0'37$

EJEMPLOS NUMÉRICOS. — I.^o *Se desea utilizar una línea en tubo ya tendido, de 4 milímetros de diámetro. ¿Cuántos amperios pueden enviarse?*

Substituyendo valores numéricos en la fórmula [8] se tiene:

$$I = 4'3 \sqrt{4^3} = 34'4 \text{ amperios.}$$

2.º Calcular el conductor para una canalización interior, por la cual van a circular 15 amperios.

La fórmula [9] nos dará para este caso

$$d = 0'36 \sqrt[3]{15^2} = 2'18 \text{ mm.}$$

Caída de potencial. — Los dos métodos anteriores para calcular conductores, son utilizables únicamente en el caso de líneas cortas. Para líneas largas, es forzoso calcular, o comprobar los cálculos, atendiendo siempre a la caída de potencial, para no exponernos a desagradables sorpresas.

Un hilo de resistencia R , atravesado por una corriente de I amperios, consume una tensión dada por la fórmula de Ohm (tomo I, pág. 98):

$$e = I R \quad [10]$$

Recordando el valor de R (tomo I, pág. 89), podemos poner

$$e = I \rho \frac{l}{s} = l \rho \frac{I}{s} \quad [11]$$

o en función de la *densidad de corriente*

$$e = l \rho \delta \quad [12]$$

Si expresamos I como cociente de vatios por voltios, y la tensión perdida e como fracción p de la tensión de servicio,

$$I = \frac{W}{V} \quad e = p V$$

tendremos la fórmula [11] convertida en

$$\phi V = \frac{W}{V} \rho \frac{l}{s} \quad [13]$$

Expresando l en metros y s en milímetros cuadrados, pueden tomarse, para el cobre, como fórmulas prácticas, deducidas respectivamente de las [11], [12] y [13]

$$e = 0'02 \frac{lI}{s} \quad e = 0'02l\delta \quad \phi V = 0'02 \frac{Wl}{Vs} \quad [14]$$

De estas fórmulas podrán deducirse las siguientes, útiles para calcular secciones de conductores:

$$s = 0'02 \frac{lI}{e} \quad \delta = 50 \frac{e}{l} \quad s = 0'02 \frac{lW}{\phi V^2} \quad [15]$$

EJEMPLOS NUMÉRICOS. — 1.º *Se desea transmitir 15 amperios a 600 metros de distancia (1200 metros de conductor), consintiendo una caída de potencial de 10 voltios. Calcular la sección del hilo necesario.*

Empleando la primera de las fórmulas [15], tendremos:

$$s = 0'02 \frac{1200 \times 15}{10} = 36 \text{ mm}^2.$$

que corresponde a un diámetro de unos 6'5 mm.

2.º *Se dispone de una línea de 8 mm² de sección y 800 metros de conductor (400 metros de distancia) que puede tomar en su origen 100 voltios de tensión. Al final de esta línea, se va a hacer una instalación de bombillas de incandescencia, que consumirán 500 vatios y se desea saber para qué voltaje se deben comprar las bombillas.*

+ Calcularemos el tanto por ciento de pérdida y, como consecuencia, la pérdida absoluta de tensión al final de la línea, mediante la fórmula

$$p = 0'02 \frac{lW}{s V^2}$$

deducida fácilmente de la tercera de las [15].

Substituyendo valores numéricos

$$p = 0'02 \frac{800 \times 500}{8 \times 100^2} = 0'10$$

Si la tensión inicial es de 100 voltios y la pérdida en línea es de 10 por 100, la tensión final será 90, para cuya tensión deben comprarse las lámparas.

3.º *Se transmite una potencia W por una línea de sección s y longitud l perdiéndose un p por 100 de tensión. Se desea variar la tensión inicial, para que la pérdida se reduzca a la cuarta parte.*

Permaneciendo invariables los valores s, l, W, la fórmula [15] nos dice que debe permanecer invariable el producto $p V^2$. Llamemos x a la nueva tensión y deberemos tener

$$p V^2 = \frac{1}{4} p x^2 \quad \text{o} \quad V^2 = \frac{x^2}{4}$$

de donde se deduce

$$x^2 = 4 V^2 \quad \text{o} \quad x = 2 V;$$

luego bastará duplicar la tensión, para que la pérdida se reduzca a la cuarta parte.

Ventaja de las altas tensiones. — En el último ejemplo, hemos visto que con sólo duplicar la ten-

sión se reduce al cuarto la pérdida. Pueden obtenerse reglas generales para deducir las ventajas de las altas tensiones, sin más que examinar atentamente la fórmula [I] y la tercera de las [I5].

Si en la [I] expresamos la intensidad I como cociente de vatios W por voltios V , obtendremos la nueva fórmula

$$s = \frac{W}{8 V}$$

la cual nos dice que, *cuando se calcula por densidad de corriente, la sección de un conductor es inversamente proporcional a la tensión adoptada*, ya que la tensión V está en el divisor de la sección s .

Por la misma razón, de la fórmula [I5] podemos deducir que *cuando se calcula por caída de tensión la sección de un conductor es inversamente proporcional al cuadrado de la tensión adoptada*.

Puede también deducirse de la fórmula [I5] que

$$l = \frac{s \phi}{0'02 W} V^2$$

es decir, *la distancia a que puede transmitirse una potencia dada, con un conductor determinado, es proporcional al cuadrado de la tensión adoptada*.

Regla de Thomson. — Hemos dicho que cuando la energía eléctrica no se produce en buenas condiciones económicas, puede dudarse, al establecer una línea de transmisión, entre gastar mucho cobre en el conductor para no perder vatios durante el funcionamiento, o bien, ahorrar cobre en la insta-

lación, aun cuando luego durante la explotación se pierda energía por el efecto Joule del conductor.

La *regla de Thomson* tiene por objeto determinar las condiciones de la línea para que su coste total de instalación y explotación sea un mínimo. Se llama también *cálculo económico*.

Las fórmulas de Thomson se deducen por procedimientos matemáticos que es imposible emplear aquí. Nos limitaremos a dar como empíricas las fórmulas y mostrar sus aplicaciones con algunos ejemplos prácticos.

Las letras que intervienen en las diversas fórmulas, significan:

l , longitud del conductor.

s , sección de mismo.

ρ , resistividad de su metal.

I , intensidad que circula por la línea.

h , horas que funciona en un año.

ϕ , precio en pesetas de un vatio hora.

m , una constante de proporcionalidad que representa el precio en pesetas de la mano de obra, por metro de línea.

n , el precio del material por metro de línea de milímetro de sección.

a , tanto por ciento que se fija para amortizar el capital empleado en la instalación de la línea.

La *sección más económica* se obtiene empleando la fórmula

$$s = 10 I \sqrt{\frac{\rho h \phi}{n a}} \quad [16]$$

la mejor densidad

$$\delta = 0'1 \sqrt{\frac{na}{\rho h \phi}} \quad [17]$$

la caída de tensión más conveniente

$$e = 0'1 l \sqrt{\frac{\rho n a}{h \phi}} \quad [18]$$

y con tales condiciones, se obtiene un gasto anual

$$G = \frac{m l a}{100} + \frac{l I}{5} \sqrt{\rho h \phi n a}$$

Valores de los coeficientes. — Para la aplicación de estas fórmulas, es necesario conocer los valores de los coeficientes m y n . Lo mismo la mano de obra que el material, varían en sus precios de un modo notable, con las circunstancias de lugar, tiempo, accidentes del terreno, facilidad del transporte, etc., etc. Para que puedan servir de guía en cálculos aproximados, copiamos a continuación una tabla de valores de m y n , calculados por Hochenegg, suponiendo que el cobre en bruto cueste tres pesetas el kilogramo:

	m	n
Conductor desnudo con dos hilos por poste	0'23	0,026
Con cuatro hilos por poste...	0'17	0,026
— ocho — —	0'13	0,026
Cable con dos por zanja	4'00	0,058
— con tres —	3'40	0,058
— con cinco —	3'00	0,058
— con siete —	2'70	0,058

EJEMPLO. — *Se desea calcular una línea aérea para transmitir 15 amperios a 1250 metros (2500 metros de conductor) para obtener la mayor economía. Se desea amortizar el capital de instalación en diez años; el fluido se obtiene en fábrica a 0'40 el kilovatio hora y la instalación funcionará 10 horas diarias, o sea 3600 anuales.*

Del enunciado se deducen los valores siguientes para la aplicación de las fórmulas

$$l = 2500 \quad a = 10 \quad p = 0,0004 \quad I = 15 \quad \rho = 0'02 \\ h = 3600 \quad n = 0'026$$

por lo tanto, la mejor sección será [16]

$$s = 10 \times 15 \sqrt{\frac{0,02 \times 3600 \times 0,0004}{0,026 \times 10}} = 50 \text{ mm}^2$$

que corresponde a un diámetro de 8 mm.; la mejor densidad de corriente será [1]:

$$\delta = \frac{15}{50} = 0,3 \text{ amp. mm.}^2$$

y la caída de tensión más conveniente [14]

$$e = 0'02 \times 2500 \times 0'3 = 15 \text{ voltios.}$$

CAPÍTULO III

LÍNEAS PARA CORRIENTE ALTERNA

+ **Cálculo de conductores.** — El problema de la transmisión de la energía a largas distancias, la extensión alcanzada por las redes de distribución, y el gran empleo que se hace ya de los alternomotores, son causas que han dado enorme impulso a la transmisión y distribución por corriente alterna.

Los conductores de poca longitud para corriente alterna, podríamos calcularlos atendiendo a las mismas consideraciones que en el caso de corriente continua, sin más que corregir la resistencia de los mismos, teniendo en cuenta que los efectos de autoinducción, con las corrientes alternas, dan una *resistencia aparente siempre mayor que la resistencia efectiva de los conductores* (tomo II, pág. 29).

Para calcular la resistencia aparente R_a de conductores de cobre, conociendo la efectiva R , dió Mr. Potier la fórmula empírica

$$R_a = R \left(1 + \frac{d^4 f^2}{100000000} \right)$$

en la cual d es el diámetro del conductor en milímetros y f la frecuencia de la corriente alterna.

EJEMPLO. — *Calcular las resistencias efectiva y aparente de un conductor de cobre de 1000 metros longitud y 11 milímetros de diámetro (95 mm² de sección), según circule una corriente continua, o una alterna de 50 períodos.*

La resistencia efectiva será, según la fórmula conocida (tomo I, pág. 89),

$$R = 0'02 \frac{1000}{95} = 0,21 \text{ ohmios.}$$

La resistencia aparente será

$$\begin{aligned} R_a &= 0,21 \left(1 + \frac{11^4 \times 50^2}{100000000} \right) \\ &= 0'21 (1 + 0'36) = 0'28 \end{aligned}$$

El aumento es solamente de 0'07 de ohmio.

Como las líneas de transmisión para corriente alterna alcanzan grandes longitudes, deberán calcularse siempre atendiendo a la caída de tensión, y este procedimiento, que consideramos el más interesante, es el que vamos a estudiar con algún detalle, siguiendo un método debido a M. Blondel, pero simplificando su exposición cuanto sea posible y suprimiendo los razonamientos y demostraciones que no encajen en los límites de elementalidad impuestos a estos libros.

Elección de frecuencias y tensiones. — La fuerza electromotriz que nace en una espira, moviéndose en un campo magnético, alcanza un valor máximo (tomo II, páginas 22 y 25)

$$E_o = \mathcal{N} a = \mathcal{N} 2 \pi f.$$

y si fuesen N espiras unidas en tensión

$$E_o = 2 \pi \mathcal{U} N f.$$

Refiriéndonos a la fuerza electromotriz eficaz (tomo II, pág. 34), podemos decir que es proporcional al flujo \mathcal{U} , al número de espiras N y a la frecuencia f :

$$E = K \mathcal{U} N f.$$

Esta fórmula hace ver que para una tensión dada E , el generador exigirá menor excitación \mathcal{U} cuanto mayor sea la frecuencia, y esta reducción de excitación disminuye el precio de la máquina.

Pero una frecuencia elevada ($f = n p$) exige una velocidad n exagerada, o un gran número $2 p$ de polos inductores. Los alternadores que marchan a gran velocidad, son difíciles de acoplar. Además, las altas frecuencias dan mucha velocidad a los motores receptores, lo cual es siempre un inconveniente, y especialmente para la tracción.

La tensión se fija teniendo en cuenta la potencia que debe transmitirse y la longitud de la línea (fórmula 15 del capítulo anterior). Puede modificarse la tensión adoptada, en vista de la sección de cobre que resulte para los conductores.

Es verdad que cuanto mayor sea la tensión, menor es el gasto de cobre; pero también es cierto que con la tensión crecen los gastos de aisladores, interruptores, transformadores, etc.

Si la tensión es menor de 10000 voltios, es económico el producirla directamente en los generadores. Para tensiones mayores, es indispensable el

empleo del transformador elevador, antes de enviar la corriente a línea.

La pérdida de tensión en línea, pasa en las grandes transmisiones de un 20 por 100. «Riegos y Fuerza del Ebro», en sus saltos de Lérida, produce a 6000 voltios, eleva a 110000 y recibe en Barcelona a 80000. Pierde en línea casi un 30 por 100.

Resistencia kilométrica y total de un conductor.—

Llamando R_k a la resistencia de un kilómetro de línea, tendremos su resistencia total, multiplicando aquel valor por la longitud l expresada en kilómetros

$$R = l R_k$$

El valor R_k lo calcularemos por la fórmula conocida (tomo I, pág 89); pero dadas las longitudes de línea que vamos a considerar, tomaremos como coeficiente de resistividad 0'017 en lugar del aproximado 0'02 que hemos tomado cuando se trataba de conductores cortos. Tendremos, pues,

$$R_k = 0'017 \frac{1000}{s} = \frac{17}{\pi d^2 : 4} = \frac{21'64}{d^2}$$

llamando d al diámetro, en milímetros, de la sección.

Así, por ejemplo, la resistencia kilométrica de un conductor de 10 milímetros de diámetro, será

$$R_k = \frac{21'64}{10^2} = 0'2164$$

y la total de 10 kilómetros

$$R = 10 \times 0'2164 = 2'164 \text{ ohmios.}$$

Autoinducción e inducciones mutuas kilométricas. — Consideremos una línea formada por varios conductores de diámetro d milímetros, distantes uno de otro D centímetros, y recorridos todos por un sistema completo de corrientes polifásicas (tomo II, pág. 78).

En un conductor cualquiera, aparece un efecto de autoinducción, debido a la corriente que circula por él mismo, cuyo coeficiente kilométrico, expresado en henrios, es

$$\mathcal{L}_k = [6'491 - 4'605 \log d] \times 10^{-4} \quad [1]$$

En el mismo conductor, aparecen efectos de inducción mutua, debidos a las corrientes que circulan por los conductores vecinos. El coeficiente kilométrico de este efecto, expresado en henrios, es

$$\mathcal{M}_k = [4'605 \log D] \times 10^{-4} \quad [2]$$

EJEMPLOS. — 1.º *Coficiente kilométrico de autoinducción de un conductor de 15 milímetros de diámetro.*

Empleando la fórmula [1], tendremos:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_k &= [6'491 - 4'705 \times \log 15] \times 10^{-4} = \\ &[6'491 - 4'605 \times 1'176091] \times 10^{-4} = 0'00016 \text{ henrios} \end{aligned}$$

2.º *Coficiente kilométrico de inducción mutua entre dos conductores de una línea, separados uno de otro 70 centímetros.*

La fórmula [2] nos da

$$\mathcal{M}_k = [4'605 \log 70] \times 10^{-4} = 0'00011 \text{ henrios.}$$

Inducciones y desfasajes aparentes. — En una línea formada por dos o más conductores, llamaremos inducción aparente de un conductor, a la resultante de su autoinducción y de las inducciones producidas por los demás conductores. La representaremos por L .

Esta autoinducción produce un desfasaje aparente ψ , entre la corriente y la tensión (tomo II, página 31).

Lo mismo el coeficiente de autoinducción que el desfasaje aparente, se calculan por fórmulas especiales, apropiadas a cada uno de los sistemas polifásicos y a cada una de las formas de líneas.

Veamos los casos de corrientes monofásicas y trifásicas.

Corriente monofásica. — Consideremos una línea de dos hilos, llevando una corriente monofásica.

Si la autoinducción es debida a una corriente senoidal i , la inducción mutua será debida a una corriente $-i$. Ambos efectos deben ser de la misma dirección, aunque de sentidos contrarios; luego la autoinducción aparente debe ser

$$L = \mathcal{L} - \mathcal{M} \quad [3]$$

y el desfasaje consiguiente

$$\psi = 0 \quad [4]$$

Substituyendo \mathcal{L} y \mathcal{M} por sus valores conocidos por las fórmulas [1] y [2], se obtiene

$$L_k = \left[6'491 + 4'605 \log \frac{D}{d} \right] \times 10^{-4} \quad [5]$$

++ **Corrientes trifásicas.** — Sea una línea formada con tres hilos 1, 2 y 3, por los cuales circula un sistema completo de corrientes trifásicas, es decir, tres corrientes desfasadas una de otra un tercio de período.

Distinguiremos con subíndices 1, 2, 3, los coeficientes \mathcal{L} de autoinducción de los diversos conductores, y con subíndices dobles 1.2, 1.3, 2.3, los de inducción mutua \mathcal{M} entre cada dos hilos de la línea.

El coeficiente de inducción aparente L_1 y el desfasaje aparente ψ_1 , para el primero de los hilos de línea, vienen dados por las fórmulas

$$L_1^2 = \left[6'491 + 4'605 \log \frac{\sqrt{D_{1.2} D_{1.3}}}{d} \right]^2 10^{-8} + \left[4 \log \frac{D_{1.3}}{D_{1.2}} \right]^2 10^{-8} \quad [6]$$

$$\text{tang } \psi_1 = \frac{4 \log D_{1.3} : D_{1.2}}{6'491 + 4'605 \log \sqrt{D_{1.2} D_{1.3}} : d} \quad [7]$$

Permutando circularmente los subíndices 1, 2, 3 se obtienen los valores $L_2 \psi_2$ $L_3 \psi_3$.

EJEMPLOS. — 1.º *Autoinducción aparente de cada uno de los hilos de una línea monofásica, siendo el diámetro de estos hilos $d = 8$ mm. y su separación $D = 80$ cm.*

La fórmula [5] nos da

$$L_k = \left[6'491 + 4'605 \log \frac{80}{8} \right] \times 10^{-4} = 0'0011.$$

2.º *Autoinducción aparente y desfase de cada uno de los hilos de una línea trifásica, formada por conductores de 12 mm., situados en un plano y separado el hilo medio de cada uno de los extremos 48 centímetros.*

Tendremos para el hilo medio, que llamaremos hilo 1,

$$D_{1.2} = 48 \qquad D_{1.3} = 48$$

y substituyendo valores numéricos en la fórmula [6]

$$L_m^2 = \left[6'491 + 4'605 \log \frac{\sqrt{48 \times 48}}{12} \right]^2 \times 10^{-8} + \left[4 \log \frac{48}{48} \right]^2 \times 10^{-8} =$$

$$[6'491 + 4'605 \log 4]^2 \times 10^{-8} = 9'16^2 \times 10^{-8}$$

y extrayendo la raíz cuadrada

$$L_m = 0,000916 \text{ henrios.}$$

Substituyendo igualmente en la fórmula [7] hallamos

$$\text{tang } \psi_m = 0.$$

Si consideramos ahora uno de los hilos extremos, tendremos:

$$D_{1.2} = 48 \qquad D_{1.3} = 96$$

y la fórmula [6] nos da

$$L_e^2 = \left[6'491 + 4'605 \log \frac{\sqrt{48 \times 96}}{12} \right]^2 \times 10^{-8} + [4 \log 2]^2 \times 10^{-8} = 100'46 \times 10^{-8}$$

y extrayendo la raíz cuadrada,

$$L_e = 0'001$$

El desfase, calculado por la fórmula [7] es

$$\operatorname{tang} \psi_e = \frac{4 \log 2}{6'491 + 4'605 \log 5'65} = -0,12$$

Línea trifásica doble. — Supongamos que por unos mismos postes se llevan dos líneas trifásicas 1, 2, 3 y 1', 2', 3'.

Siendo concordantes las corrientes de los hilos 1 y 1', es evidente que sobre el conductor 1 se sumarán los efectos de su autoinducción \mathcal{L}_1 y de la inducción producida por 1' que es $\mathcal{M}_{1,1'}$.

Del mismo modo, sobre el conductor 1, se sumarán las inducciones producidas por los conductores 2 y 2'.

$$\mathcal{M}_{1,2} + \mathcal{M}_{1,2'}$$

y las producidas por los 3 y 3'

$$\mathcal{M}_{1,3} + \mathcal{M}_{1,3'}$$

Las fórmulas de autoinducciones y desfases aparentes [6] y [7] se modificarán para la línea doble, de este modo

$$L_1^2 = \left[6'491 + 4'605 \log \frac{\sqrt{D_{1,2} D_{1,2'} D_{1,3} D_{1,3'}}}{D_{1,1'} d} \right]^2 10^{-8} + \left[4 \log \frac{D_{1,3} D_{1,3'}}{D_{1,2} D_{1,2'}} \right]^2 10^{-8} \quad [8]$$

$$\operatorname{tang} \psi_1 = \frac{4 \log \frac{D_{1,3} D_{1,3'}}{D_{1,2} D_{1,2'}}}{6'491 + 4'605 \log \frac{\sqrt{D_{1,2} D_{1,2'} D_{1,3} D_{1,3'}}}{D_{1,1'} d}} \quad [9]$$

Líneas simétricas. — Una línea sencilla o doble, se llama simétrica, cuando resultan para todos sus hilos, iguales las inducciones aparentes y nulos los desfases.

La línea sencilla de corrientes monofásicas es siempre simétrica.

La línea sencilla de corrientes trifásicas, es simétrica cuando sus conductores ocupan los vértices de un triángulo equilátero.

En tal caso es evidente que

$$D_{1.2} = D_{1.3} = D_{2.3} = D$$

y las fórmulas [6] y [7] se reducen, para los tres conductores, a

$$L = \left[6'491 + 4'605 \log \frac{D}{d} \right] 10^{-4} \quad [10]$$

$$\text{tang } \psi = 0 \quad [11]$$

En la figura 15 se representan diversas disposiciones de una línea trifásica doble.

Las disposiciones *A* y *B* en polígono regular cumplen las condiciones de simetría, lo cual facilita extraordinariamente el cálculo de las líneas.

La «Energía Eléctrica de Cataluña» emplea la disposición *B* para sus líneas de 80000 voltios; la «Canadiense» emplea la *E* para la transmisión de 100000 y la *C* para la de 25000.

En la disposición *B* se verifica

$$D_{1.2} = D_{1.3} \quad D_{1.3} = D_{1.2}$$

con lo cual las fórmulas [8] y [9] nos dan para todos los conductores

$$L = \left[6'491 \times 4'605 \log \frac{D_{1.2} D_{1.3}}{D_{1.1} d} \right] 10^{-4} \quad [12]$$

$$\text{tang } \psi = 0 \quad [13]$$

EJEMPLOS NUMÉRICOS. — 1.º *Coficiente kilométrico de autoinducción aparente, de una línea monofásica o trifásica sencillas, siendo la distancia de hilo a hilo de 70 centímetros y el diámetro de los conductores de 7 milímetros.*

La fórmula [5] nos dará

$$L_k = \left[6'491 + 4'605 \log \frac{70}{7} \right] 10^{-4} = 0'0011$$

2.º *Coficiente kilométrico de autoinducción aparente de una línea trifásica doble, cuyos conductores están dispuestos según los vértices de un exágono regular, cuyo lado tiene 70 centímetros, siendo el diámetro de los hilos de 7 milímetros.*

Con la disposición *B* de la figura 15, tendremos

$$D_{1.2} = 70 \quad D_{1.3} = 70 \sqrt{3} \quad D_{1.1} = 2 \times 70$$

con lo cual la fórmula [12] nos dará

$$L = \left[6'491 \times 4'605 \log \frac{70 \sqrt{3}}{2 \times 7} \right] 10^{-4} = 0,00108$$

Relación entre los elementos de la línea y de la corriente. — Consideremos una larga línea recorrida por corrientes alternas y llamemos en ella *I* a la intensidad en un conductor.

*v*₁ a la tensión simple en el origen de la línea.

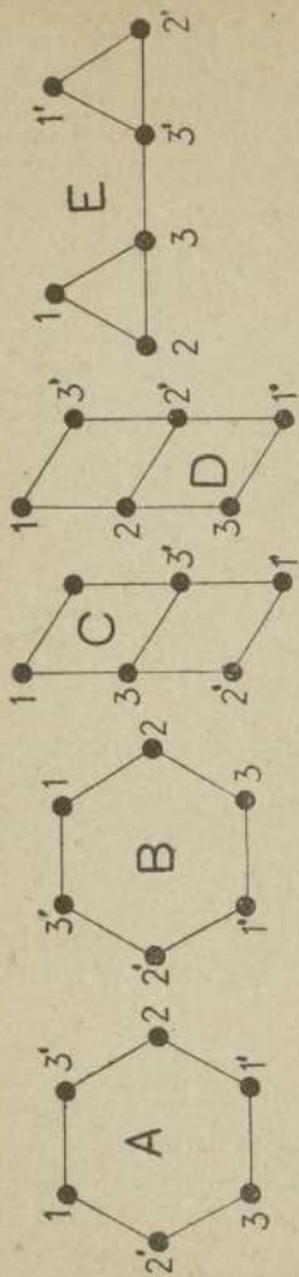


Fig. 15

v_2 a la tensión simple en el final de la línea.

R , L y Z a la resistencia, autoinducción aparente e impedancia.

φ al factor de potencia de la línea.

l a la longitud en kilómetros.

ϕ al tanto por ciento de la tensión inicial, que se pierde en línea.

Entre estas cantidades, se establecen las relaciones siguientes:

$$v_1^2 = v_2^2 + (Z I)^2 + 2 v_2 I (R \cos \varphi + a L \operatorname{sen} \varphi) \quad [14]$$

$$I = \frac{v_1}{l} A \quad [15]$$

$$I = \frac{v_2}{l} B \quad [16]$$

$$v_1 - v_2 = \phi v_1 \quad [17]$$

Las constantes A y B que contienen las fórmulas [15] y [16] se relacionan entre sí de este modo:

$$B = \frac{A}{1 - \phi} \quad [18]$$

Método de Blondel. — Escogido el tipo de línea que se quiere estudiar, en cuanto a número de fases, número de circuitos y posiciones relativas de los distintos conductores de la línea, pueden construirse gráficos o calcular tablas de los valores que toman los coeficientes A y B , para los valores más usuales de $\cos \varphi$, a y ϕ .

La construcción y empleo de tales gráficos o tablas constituyen el método de Blondel para el

cálculo de líneas de transmisión de corrientes alternas.

El cuadro impuesto a estos libros nos impide detallar el cálculo de tablas y la construcción de gráficos, cuyos trabajos exigen conocimientos matemáticos muy superiores a los que suponemos en nuestros lectores.

Para explicar el empleo de estas tablas en el cálculo de líneas, damos las siguientes, que corresponden a una línea trifásica, simétrica, con una separación de hilos de 70 centímetros y por la cual circula una corriente de 50 períodos de frecuencia.

PROBLEMA 1.º A través de una línea trifásica, formada con conductores de 8 milímetros, situados según los vértices de un triángulo equilátero y con 70 centímetros de hilo a hilo, se desea transmitir a 5 kilómetros 8 amperios que lleguen a 5000 voltios a una estación receptora cuyo factor de potencia sea $\cos \varphi = 0'9$. ¿Qué tensión debe tenerse en el origen de la línea?

Calcularemos primeramente el coeficiente kilométrico de autoinducción aparente como en el ejemplo de la página 69, y tendremos,

$$L_k = 0'0011$$

luego

$$L = L_k l = 0'0011 \times 5 = 0'0055$$

Del mismo modo, tendremos para la resistencia (página 65)

$$R_k = \frac{21'64}{64} = 0'38$$

$$R = 5 \times 0'38 = 1'9$$

VALORES DEL COEFICIENTE A

ρ	DIÁMETRO DE LOS CONDUCTORES									
	4 mm.	5 mm.	6 mm.	7 mm.	8 mm.	9 mm.	10 mm.	12 mm.		
Para $\cos \varphi = 1$										
0,01	0,007218	0,011276	0,016222	0,022033	0,028738	0,036289	0,044657	0,063711		
0,03	0,021636	0,033771	0,048502	0,065717	0,085410	0,107354	0,131297	0,184131		
0,05	0,036032	0,056189	0,080567	0,108903	0,141056	0,176501	0,214651	0,296688		
0,07	0,050390	0,078530	0,112427	0,151606	0,201207	0,243874	0,295066	0,402701		
0,10	0,071926	0,111900	0,159828	0,214790	0,276008	0,341887	0,410758	0,551483		
0,15	0,107686	0,167140	0,237833	0,317881	0,505035	0,497902	0,592173	0,777585		
Para $\cos \varphi = 0,9$										
0,01	0,007071	0,010431	0,014082	0,017878	0,021726	0,025589	0,029229	0,036171		
0,03	0,021208	0,031294	0,042247	0,053612	0,065113	0,076442	0,087403	0,107864		
0,05	0,035336	0,052166	0,070408	0,089315	0,108392	0,127134	0,145197	0,178707		
0,07	0,049454	0,073017	0,097567	0,124988	0,151583	0,177619	0,202621	0,248734		
0,10	0,070614	0,104305	0,140797	0,178439	0,216183	0,251861	0,288075	0,352395		
0,15	0,105834	0,156446	0,211151	0,276374	0,323380	0,377500	0,428723	0,521147		

Para $\cos \varphi = 0,8$										
0,01	0,007465	0,010752	0,014138	0,017505	0,020790	0,023891	0,026799	0,032022		
0,03	0,022364	0,032311	0,042405	0,052523	0,062332	0,071626	0,080303	0,095817		
0,05	0,037218	0,053648	0,070677	0,087541	0,103868	0,119306	0,133684	0,159283		
0,07	0,052029	0,075341	0,098922	0,122557	0,145392	0,166928	0,186940	0,222432		
0,10	0,074153	0,106299	0,141291	0,179720	0,207643	0,238257	0,266589	0,316550		
0,15	0,110833	0,160409	0,211841	0,262621	0,311323	0,356858	0,398821	0,471865		
Para $\cos \varphi = 0,7$										
0,01	0,008035	0,011309	0,014572	0,017664	0,020627	0,023324	0,025794	0,030105		
0,03	0,024027	0,033870	0,043684	0,053068	0,061874	0,069973	0,077349	0,090219		
0,05	0,039879	0,056550	0,072754	0,088432	0,103120	0,116613	0,128888	0,150200		
0,07	0,055782	0,078752	0,101778	0,123780	0,144356	0,163247	0,180394	0,210062		
0,10	0,079105	0,112207	0,145228	0,177228	0,206235	0,233183	0,257571	0,299584		
0,15	0,117722	0,167584	0,217448	0,264766	0,224349	0,349707	0,386037	0,447712		

VALORES DEL COEFICIENTE B

DIÁMETRO DE LOS CONDUCTORES

ρ	4 mm.	5 mm.	6 mm.	7 mm.	8 mm.	9 mm.	10 mm.	12 mm.
Para $\cos \varphi = 1$								
0,01	0,007291	0,011390	0,016386	0,022256	0,029028	0,036656	0,045108	0,064355
0,03	0,022305	0,034816	0,050002	0,067750	0,088052	0,110675	0,135358	0,189826
0,05	0,037928	0,059147	0,084808	0,114635	0,149480	0,185791	0,225949	0,312304
0,07	0,054183	0,084441	0,120890	0,163018	0,216460	0,262231	0,317276	0,433012
0,10	0,079918	0,124333	0,177587	0,238656	0,306676	0,379875	0,456398	0,612759
0,15	0,126690	0,196636	0,279804	0,373978	0,477100	0,585768	0,696675	0,914806
Para $\cos \varphi = 0,9$								
0,01	0,007143	0,010536	0,014225	0,018059	0,021946	0,025848	0,029525	0,036536
0,03	0,021864	0,032262	0,043554	0,055270	0,067127	0,078806	0,090106	0,111200
0,05	0,037196	0,054912	0,074114	0,094016	0,114097	0,133826	0,152839	0,188113
0,07	0,053176	0,078513	0,105986	0,134396	0,162993	0,190989	0,217873	0,267456
0,10	0,078460	0,115895	0,156442	0,188266	0,240204	0,279846	0,320084	0,391439
0,15	0,124511	0,184055	0,248414	0,314558	0,380448	0,444118	0,504381	0,613115

Para $\cos \varphi = 0,8$

0,01	0,007540	0,010861	0,014281	0,017682	0,021000	0,024132	0,027070	0,323346
0,03	0,023057	0,033310	0,043717	0,054147	0,064260	0,073842	0,082787	0,098781
0,05	0,039177	0,056472	0,074397	0,092148	0,109335	0,125586	0,140721	0,167667
0,07	0,055945	0,081012	0,106368	0,131782	0,156335	0,179493	0,201011	0,239175
0,10	0,082398	0,118111	0,156990	0,199690	0,230715	0,264731	0,296210	0,351723
0,15	0,130392	0,188717	0,249225	0,308967	0,366263	0,419833	0,469202	0,555136
Para $\cos \varphi = 0,7$								
0,01	0,008116	0,011424	0,014719	0,017842	0,020835	0,023560	0,026055	0,030408
0,03	0,024770	0,034918	0,045035	0,054709	0,063788	0,072137	0,079741	0,093009
0,05	0,041977	0,059316	0,076583	0,093085	0,108548	0,122751	0,135672	0,158106
0,07	0,059981	0,084680	0,109439	0,133097	0,155222	0,175535	0,193973	0,225874
0,10	0,087895	0,124675	0,161365	0,196419	0,229151	0,259093	0,286191	0,332872
0,15	0,138497	0,197158	0,255822	0,311490	0,263940	0,411421	0,454162	0,526721

Conociendo los valores de R y L puede calcularse la impedancia del circuito (tomo II, pág. 29).

$$Z = \sqrt{(1'9)^2 + (2 \pi f \times 0'0055)^2} = 2'51$$

Por fin, sabiendo el valor de $\cos \varphi$, puede también calcularse (tomo II, pág. 13)

$$\text{sen } \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = \sqrt{1 - 0'81} = 0'4.$$

Podemos ya substituir valores en la fórmula [14]:

$$V_1 = \sqrt{(5000)^2 + (2'5 \times 8)^2 + 2 \times 5000 \times 8 \times (1'9 \times 0'9 + 2 \pi \times 50 \times 0'0055 \times 0'4)} = 5020 \text{ voltios}$$

que será la tensión debida en el origen de la línea.

+++ EJEMPLO 2.º *Comprobar el mismo ejemplo anterior, mediante las tablas del método de Blondel.*

En el enunciado del problema, tenemos los datos siguientes:

$$I = 8 \quad v_2 = 5000 \quad l = 5$$

y con ellos podemos aplicar la fórmula [15], para obtener

$$A = \frac{l I}{v_1} = \frac{5 \times 8}{5000} = 0'008.$$

En la tabla de los valores A , correspondientes a $\cos \varphi = 0'9$ y $d = 8$, todos los números consignados son superiores a 0'008, lo cual prueba que la pérdida de tensión es inferior al 1 por 100, según hemos visto en la primera solución del problema.

PROBLEMA 3.º Una corriente monofásica de 30000 voltios, con $\cos \varphi = 0'8$ debe transmitirse por una línea de 100 kilómetros, formada por dos conductores de 7 milímetros de diámetro, permitiéndose una caída de tensión de un 10 por 100. ¿Qué intensidad puede circular por la línea?

La tensión compuesta de 30000 voltios corresponde, en corrientes monofásicas, a una tensión simple de 15000. Con este valor de v_1 y sabiendo además que $\cos \varphi = 0'8$, $d = 7$ y $p = 0'10$, buscaremos en la tabla correspondiente $A = 0'179720$, y la fórmula [15] nos dará

$$I = \frac{v_1}{l} A = \frac{15000}{100} \times 0'179720 = 26'9$$

A esta intensidad corresponde una densidad de

$$\frac{26'9}{38'5} = 0'6$$

que es perfectamente admisible.

La tensión simple a la llegada será (fórmula 17)

$$v_2 = v_1 (1 - p) = 15000 \times 0'9 = 13500$$

y la compuesta

$$V_2 = 2v_2 = 27000$$

La potencia recibida (tomo II, pág. 37)

$$W_2 = V_2 I \cos \varphi = 27000 \times 26'9 \times 0'8 = 624000.$$

Perdiéndose 3000 voltios con 26'9 amperios, tendremos una pérdida en vatios de

$$0'8 \times 3000 \times 26'9 = 64560$$

y el rendimiento de la transmisión será

$$\text{Rend.} = \frac{624000}{624000 + 64560} = 0'906$$

PROBLEMA 4.º *Al final de una transmisión trifásica en estrella, con 24 kilómetros de línea y conductores de 8 milímetros de diámetro, se desea recibir 13800 voltios de tensión entre fases con 11'5 amperios, siendo $\cos \varphi = 0'8$. ¿Cuál ha de ser la tensión inicial?*

La tensión compuesta de 13800 voltios corresponde a una tensión simple de

$$v_2 = \frac{V_2}{\sqrt{3}} = \frac{13800}{1'73} = 8000.$$

La fórmula [16] nos dará

$$B = \frac{II}{v_2} = \frac{24 \times 11'5}{8000} = 0'034500$$

Este valor de B para $\cos \varphi = 0'8$ y $d = 8$, se halla entre 0'021000 y 0'064260 pudiendo tomar como valor de p , 0'015.

La tensión simple inicial será (fórmula 17)

$$v_1 = \frac{v_2}{1 - p} = \frac{8000}{0,985} = 8111$$

y la tensión compuesta

$$V_1 = \sqrt{3} v_1 = 1'73 \times 8111 = 14000$$

Los demás detalles de la canalización, se determinarán como en el problema anterior.

PROBLEMA 5.º *Un alternador trifásico, en estrella, con neutro, produce 1111 voltios de tensión simple*

y comunica con una línea formada por conductores de 6 milímetros de diámetro. Se sabe que $\cos \varphi = 0.8$ y se desea recibir 25 amperios y 10000 voltios entre una fase y el neutro. ¿Cuál puede ser la longitud de la línea?

Conocidas las tensiones inicial y final, se ve fácilmente que la pérdida en tanto por ciento corresponde a

$$p = 0.10$$

Para $\cos \varphi = 0.8$ y $d = 6$, se halla para valor de

$$B = 0.157,$$

y con estos datos y los

$$I = 25 \qquad v_2 = 10000$$

se aplica la fórmula [16], obteniendo

$$l = \frac{v_2 B}{I} = \frac{10000 \times 0.157}{25} = 63 \text{ km.}$$

PROBLEMA 6.º *Calcular el diámetro de los conductores de una línea de 100 kilómetros que debe llevar 26 amperios por cada conductor y 13500 voltios de tensión simple, sabiendo que $\cos \varphi = 0.8$ y consintiendo un 10 por 100 de caída de tensión.*

La fórmula [16] nos dará

$$B = \frac{l I}{v_2} = \frac{100 \times 26}{13500} = 0.192590.$$

Este valor de B para $\cos \varphi = 0.8$ y $p = 0.10$, está entre 0.156990 y 0.199690, luego el diámetro buscado podrá tomarse de 6.5 mm.

PROBLEMA 7.^o Una generatriz de 10000 voltios comunica con una línea de 20 kilómetros, formada por conductores de 8 milímetros. Al final de la línea se desean 60 amperios, con $\cos \varphi = 0'8$. ¿Qué caída de tensi6n puede consentirse?

La fórmula [15] nos da

$$A = \frac{l I}{v_1} = \frac{20 \times 60}{10000} \Rightarrow 0'12$$

este valor de A , para $\cos \varphi = 0'8$ y $d = 8$, está comprendido entre 0'103868 y 0'145392, luego próximamente tendremos $p = 0'06$ y la caída de tensi6n será (f6rmula 17)

$$v_1 - v_2 = p v_1 = 0'06 \times 10000 = 600$$

Elecci6n del n6mero de fases. — Al estudiar la constituci6n de los alternadores polifásicos, es f6cil apreciar las ventajas de éstos sobre los monofásicos, en cuanto se refiere a la construcci6n de estas máquinass; pero al tratar de transmisiones, hemos de estudiar las condiciones econ6micas de las líneas para decidirnos por uno u otro n6mero de fases, seg6n las circunstancias especiales en que se proyecte.

Para comparar los distintos sistemas polifásicos, desde el punto de vista econ6mico, supondremos que los hilos se calculan de manera que en todos los sistemas se pierda el mismo n6mero de vatios, siendo igual para todos, la longitud de la línea, la tensi6n exigida por los receptores y el factor de potencia $\cos \varphi = 1$. Consideremos una línea, por la cual

deben transmitirse VI vatios, siendo r la resistencia de cada uno de los conductores. Si en la línea se gastan 100 kilogramos de cobre, en cada uno de los conductores entrarán 50 kilogramos y la pérdida total en línea, será

$$W = 2rI^2$$

Permaneciendo constante esta pérdida, examinemos el gasto necesario de cobre, cuando la distribución se haga por otro sistema de montaje o de generación de corrientes.

Sistema monofásico trifilar. — Empleando dos conductores como hilos de fase y uno neutro con la mitad de sección que los primeros, se tiene un consumo total de cobre de 31'25 kilogramos, en lugar de los ciento que se empleaban en el sistema monofásico ordinario.

Sistema difásico con cuatro conductores. — Si un sistema de corrientes difásicas se ha de transmitir con dos puentes independientes, el gasto total de cobre es de cien kilogramos, del mismo modo que en el sistema monofásico con dos conductores.

Sistema difásico con tres conductores. — Supongamos que se trata de transmitir corrientes difásicas, con un cuarto de período como diferencia de fase, por una línea de tres conductores.

Obsérvese que el hilo central, lejos de ser neutro, está más cargado que los extremos, y su sección debe ser mayor.

El gasto total de cobre empleado en este sistema, comparado con el monofásico, es de 72'8 kilogramos.

Sistemas trifásicos. — Las corrientes trifásicas pueden transmitirse mediante tres hilos, en forma de triángulo o de estrella sin neutro, y mediante cuatro hilos, que corresponde a la estrella con neutro.

Con tres conductores, el gasto de cobre alcanza a 75 kilogramos. Empleando cuatro conductores iguales, el gasto es de 33'33 kilogramos y si el neutro es de sección mitad, se reduce a 29'17.

Los resultados anteriores, hacen ver la ventaja, desde el punto de vista económico, del sistema trifásico en estrella con neutro. Sin embargo, cuando se trata de instalaciones exclusivamente dedicadas al alumbrado, se emplean también los sistemas monofásico y difásico, bien por la sencillez del montaje, o bien por la facilidad con que se arreglan las tensiones en estos sistemas. Esta última condición es sobre todo apreciable, cuando el alumbrado es por incandescencia.

De los sistemas trifásicos, se prefiere el de estrella sin neutro para los motores, y el de estrella con neutro o el triángulo para las luces.

Todo lo anterior se refiere al caso de distribuciones, en las cuales se fija la tensión que toleran los receptores. Para las líneas de transmisión, donde la tensión puede escogerse libremente, se emplea el trifásico en estrella; pero es más económico duplicar la tensión que instalar hilo neutro.

CAPÍTULO IV

CÁLCULO MECÁNICO DE LAS LÍNEAS AÉREAS

Curva del conductor. — Si en dos puntos fijos, a cierta distancia del suelo, se suspende un conductor flexible, una cuerda, o una cadena, este cuerpo flexible toma una forma determinada, que se llama *catenaria* y que está representada por AB' en la figura 16.

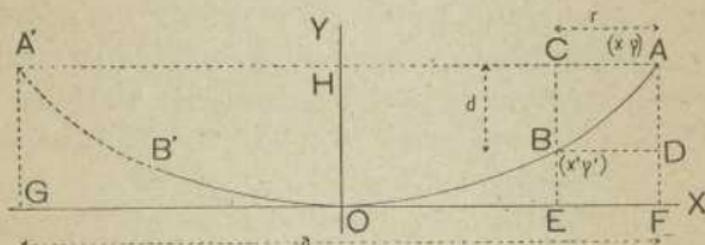


Fig. 16

Los puntos fijos A y B' se llaman *apoyos* y el punto más bajo o , se llama *vértice de la curva*.

Esta curva se aproxima tanto más a la recta que une los apoyos $A B'$ cuanto menor es su peso ϕ por unidad lineal y mayor tensión se ejerce sobre el conductor. Esta tensión, alcanza su valor máximo en el punto más bajo de la curva, es decir, en el *vértice*. T y ϕ se miden en kilogramos.

Sobre la catenaria, se determina la posición de un punto cualquiera A , midiendo su distancia horizontal al vértice, que llamaremos

$$\text{abscisa} = x = O F,$$

y midiendo también la distancia vertical al mismo vértice, que llamaremos

$$\text{ordenada} = y = O H.$$

A las abscisa y ordenada correspondientes a un punto cualquiera, se les llama conjuntamente *coordenadas del punto*.

Definiciones. — Si conservamos fijo el punto A y movemos el B' para que pase a ocupar otra posición cualquiera B , sobre la curva, el tramo de hilo $A B$ conservará su forma de arco de catenaria.

En este caso, la curva no llega al vértice, y la tensión T de que hemos hablado en el párrafo anterior, será *tensión virtual*.

Consideremos como caso general, el de apoyos A y B situados a distinta altura y establezcamos las definiciones siguientes:

APOYO VIRTUAL, es el punto A' , simétrico del apoyo más alto.

VANO REAL, es la distancia horizontal entre los apoyos reales. Es $r = E F = C A$.

VANO VIRTUAL, es la distancia horizontal entre el apoyo más alto y el apoyo virtual. Es $a = G F$.

FLECHA, es la altura del apoyo más alto. Es $j = A F = H O$.

DESNIVEL es la distancia vertical de los apoyos reales. Es $d = AD = BC$.

Llamaremos REGIÓN POSITIVA de la curva a la parte situada a la derecha del eje OY , donde está el vértice más alto, es decir, al arco OA . Llamaremos REGIÓN NEGATIVA a la parte OA' .

Coordenadas de los apoyos. — Las coordenadas de los apoyos se calculan por las fórmulas siguientes:

$$\text{Para el } A \begin{cases} \text{abscisa} & = OF = x = \frac{a}{2} \\ \text{ordenada} & = OH = y = f \end{cases} \quad [1]$$

$$\text{Para el } B \begin{cases} \text{abscisa} & = OE = x' = \frac{a}{2} - r \\ \text{ordenada} & = EB = y' = f - d \end{cases} \quad [2]$$

Los dos apoyos estarán en una misma región de la curva, cuando x' sea positiva, es decir, cuando

$$\frac{a}{2} > r \quad \text{o} \quad a > 2r \quad [3]$$

Relación entre las coordenadas de un punto. —

Para un punto cualquiera de la catenaria, se verifica siempre entre sus coordenadas la relación

$$y = \frac{p}{2T} x^2 \quad [4]$$

Valor de la flecha. — Se calcula la flecha mediante la fórmula

$$f = \frac{p a^2}{8 T} \quad [5]$$

Problemas numéricos geométricos. — Con las fórmulas establecidas, pueden resolverse todos los problemas que afecten a la forma geométrica del conductor de una línea aérea.

Resolvamos algunos ejemplos:

PROBLEMA 1.º *Un hilo de cobre de 3 milímetros, pesa 63 gramos por metro lineal. Se va a colocar entre dos apoyos de igual altura, cuya distancia horizontal es $a = 50$ metros, estirándolo con una fuerza de $T = 70$ kilogramos. ¿Cuál debe ser la flecha?*

Aplicando la fórmula [5] tendremos

$$f = \frac{0,063 \times 50^2}{8 \times 70} = 0,28 \text{ m.}$$

PROBLEMA 2.º *Con un conductor que pesa 80 gramos por metro lineal, se ha tendido una catenaria. A una distancia horizontal de 13 metros del vértice, la curva alcanza una ordenada de 40 centímetros. ¿A qué tensión está templado el conductor?*

De la fórmula [4] se deduce

$$T = \frac{p x^2}{2 y}$$

y substituyendo valores numéricos

$$T = \frac{0,080 \times 13^2}{2 \times 0,40} = 16,9 \text{ kg.}$$

Tensión en el apoyo más bajo. — El esfuerzo de tracción que el conductor ejerce sobre el apoyo inferior, se calcula mediante la fórmula

$$T = \frac{\rho r (a - r)}{2 d} \quad [6]$$

Esta tensión será virtual, cuando los dos apoyos estén a un mismo lado del eje OY .

Llevando el valor de T a la expresión [5] de la flecha, se obtiene

$$f = \frac{\rho a^2}{8} \frac{2 d}{\rho r (a - r)} = \frac{a^2 d}{4 r (a - r)} \quad [7]$$

De la fórmula [6] se deduce la siguiente que permite calcular el desnivel:

$$d = \frac{\rho r (a - r)}{2 T} \quad [8]$$

Tensión superficial. — Llamaremos tensión superficial de ruptura, al número q de kilogramos, que debe aplicarse a cada milímetro cuadrado de sección, para que el hilo se rompa.

La tensión total de ruptura será:

$$R = qs$$

Es claro que la tensión a que se somete un hilo en una línea eléctrica, no debe alcanzar nunca la tensión de ruptura, sino una fracción de ella. Esta fracción $1/n$ se llama *coeficiente de seguridad*, y generalmente se fija al tender una línea, entre $1/3$ y $1/6$.

Vemos, pues, que la tensión T a que se somete un conductor, vendrá expresada en kilogramos, por

$$T = \frac{I}{n} R = \frac{qs}{n}$$

Por otra parte, siendo s la sección del conductor, expresada en milímetros cuadrados, y δ la densidad del metal, el peso por metro vendrá dado en kilogramos por

$$p = \frac{s\delta}{1000} \quad [9]$$

Con estos valores de T y p , tendremos

$$\frac{p}{T} = \frac{s\delta}{1000} : \frac{sq}{n} = \frac{\delta}{1000q} n \quad [10]$$

y llevando esta relación a las fórmulas de la flecha [5] y del desnivel [7], se obtiene

$$[11] \quad f = \frac{a^2}{8} \cdot \frac{\delta n}{1000q} \quad d = \frac{rn\delta(a-r)}{2000q} \quad [12]$$

Tensión en un punto cualquiera. — La diferencia de tensión entre el apoyo más bajo y un punto cualquiera, es igual al peso de un trozo de hilo que tenga por longitud la ordenada del punto:

$$T' = T + pf \quad [13]$$

Como caso particular, la tensión a que queda sometido el conductor en el apoyo superior, comparada con la del vértice, es

$$T'' = T + pf.$$

La tensión máxima corresponde a una flecha

$$f = \frac{a}{\sqrt{8}}$$

y vale

$$T_{m\acute{a}x} = \frac{ap}{\sqrt{2}}$$

Vano máximo. — De la última expresión se deduce

$$a = \sqrt{2} \frac{T}{p}$$

Para los metales empleados en la construcción de líneas, hierro, cobre o aluminio, veremos que el valor $p : T$ es aproximadamente $0'0002n$; luego

$$a = \frac{\sqrt{2}}{0,0002n} = 7071 \frac{1}{n}$$

Es claro que el máximo vano corresponderá a $n = 1$, en cuyo caso el hilo se rompería; luego con conductores de hierro, cobre o aluminio, es imposible llegar a vanos de 7071 metros cualquiera que sea la flecha.

Coefficientes de seguridad en distintos puntos del conductor. — Acabamos de ver que el conductor sufre distintas tensiones en cada uno de sus puntos. Sin embargo, el coeficiente de seguridad, puede considerarse constante en toda la longitud del conductor.

Componentes de la tensión. — La tensión a que queda sometido un punto cualquiera M del conductor (fig. 17), tiene la dirección de la tangente MN , y puede descomponerse en dos componentes perpendiculares, según los principios elementales

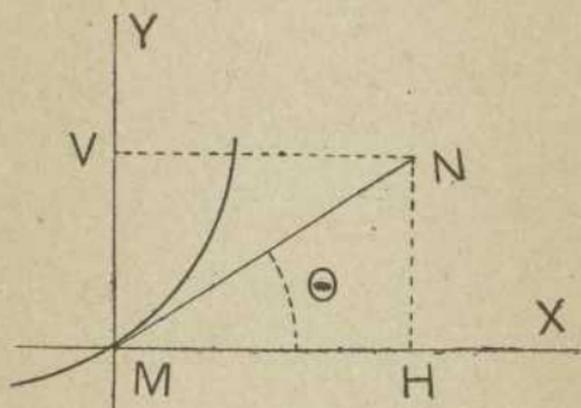


Fig. 17

de la mecánica, que son la horizontal H y la vertical V .

Los valores de H y V , para un punto cualquiera de la curva, tal como el M , se calculan mediante las fórmulas respectivas:

$$H = \frac{T T}{\sqrt{T^2 + p^2 x}}$$

$$V = \frac{T p x}{\sqrt{T^2 + p^2 x^2}}$$

Es fácil calcular al ángulo θ como relación entre los dos valores anteriores, sabiendo que

$$\text{tang } \theta = \frac{V}{H} = \frac{p x}{T'} \quad [14]$$

La componente horizontal es el esfuerzo de tracción que ha de vencer el poste, en el sentido longitudinal del trazado de la línea, y la componente vertical es la resistencia de compresión que debe vencer el poste y su empotramiento.

La resistencia de los postes en el sentido horizontal se calcula para un esfuerzo de tracción unilateral igual a $1:n$ de la carga de rotura del total de los conductores que han de sostener, teniendo en cuenta que, en dichas condiciones, el coeficiente de seguridad no puede ser inferior a 4 y suponiendo el esfuerzo referido al punto de sujeción del conductor más alto.

Para valores de n , el reglamento de instalación vigente en España da el siguiente cuadro:

Diámetro en mm.	Número de conductores de la línea			
	2	3	4	6
3	4'0	4'8	5'3	6'0
4	5'0	5'4	6'6	7'5
5	6'6	7'9	8'8	9'9
6	8'6	10	11'5	13'0
7	10'6	12'7	14'1	15'9
8	12'0	14'4	16'0	18'0

En los ángulos por cambio de alineación, las condiciones de resistencia del poste se aumentan te-

niendo en cuenta el mayor esfuerzo que el ángulo determina.

En el sentido de la compresión se calculan para resistir tres veces la carga de todos los elementos que integran la línea, aumentando el peso de un manguito de nieve de 10 cm. de diámetro.

Longitud de conductor por vano. — Conociendo las abscisas de los apoyos de un vano, x y x' , puede calcularse la longitud de conductor que debe emplearse para salvar el vano, cuando se conozca el peso lineal del hilo y la tensión a que se va a someter.

Se emplea la fórmula

$$l = (x - x') + \frac{p^2}{6 T^2} (x^3 - x'^3) \quad [15]$$

— Si los soportes estuvieran los dos a la misma altura, las abscisas serían ambas iguales y de signos contrarios, es decir, que serían

$$x = \frac{a}{2} \qquad x' = -\frac{a}{2}$$

y substituyendo en la fórmula [15] resultarían

$$l = a + \frac{p^2 a^3}{24 T^2} \quad [16]$$

Recordando el valor de la flecha, dado por la fórmula [5], puede modificarse la última de este modo:

$$l = a + \frac{a p f}{3 T}$$

Para fórmulas aproximadas y tensiones mecánicas usuales, pueden aceptarse como bastante exactas las fórmulas respectivas

$$l = x - x' \qquad l = a$$

Sobrecargas mecánicas. — Para completar el cálculo mecánico de las líneas, vamos a estudiar las variaciones que experimentan las tensiones de los hilos, cuando cambian las condiciones en que fueron instalados, es decir, cuando la temperatura hace variar la longitud de los conductores, los hielos depositados sobre ellos alteran su peso por unidad de longitud, y los vientos determinan mayores tensiones que las correspondientes a su peso.

El aumento real de peso que experimenta el hilo cuando se recubre de nieve o hielo, y el aumento aparente que corresponde al efecto de los fuertes vientos, constituyen la *sobrecarga mecánica de los conductores*.

La sobrecarga debida al hielo que pueda recubrir el conductor, será el peso h , en kilogramos, de un cilindro de hielo con una longitud de un metro y un diámetro fijado previamente o medido cuando llegue el momento de apreciarlo. Este peso deberá sumarse al del conductor para conocer la sobrecarga p' .

$$p' = p + h$$

Un viento que tenga una velocidad de v metros por segundo y sople horizontalmente sobre un conductor de d milímetros de diámetro, determina sobre éste un esfuerzo horizontal de

$$10^{-8} 312 d v^2 \text{ kilogramos.}$$

Se recomienda adoptar como valor máximo del esfuerzo del viento, 125 kilogramos por metro cuadrado, tomando como superficie expuesta a la acción del viento la longitud del conductor multiplicada por 0'70 del diámetro, que, por cada metro lineal, será

$$125 \times 0'7 d : 1000 = 875 d 10^{-4}$$

Este esfuerzo, debe componerse geoméricamente con el peso del conductor para tener la sobrecarga debida al viento, de manera que, en este caso

$$p' = \sqrt{p^2 + (10^{-4} 875 d)^2}$$

y si fuera preciso considerar simultáneamente las dos sobrecargas, de hielos y vientos, pondríamos

$$p' = \sqrt{(p + h)^2 + (10^{-4} 875 d)^2}$$

En general, se calculan separadamente la acción del viento y la sobrecarga de la nieve, suponiendo que forma un manguito de 10 centímetros de diámetro, y de los dos cálculos se adopta el que da resultados más desfavorables; toda vez que cuando sople fuerte viento no se depositará nieve en los conductores.

Variación de la longitud con la sobrecarga y la tensión. — Empezaremos por estudiar la variación de longitud del conductor cuando varían la carga y la tensión.

Nos referimos al caso más sencillo de soportes situados a igual altura, corrigiendo luego las fórmulas halladas, para que sean aplicables al caso general de soportes con desnivel.

Consideremos la longitud de conductor, dada por la fórmula [16], y si, permaneciendo constante la longitud de vano a , varían el peso y la tensión del conductor, tendremos una variación de la longitud del conductor, dada por la fórmula

$$l' - l = \frac{a^3}{24} \left(\frac{p'^2}{T'^2} - \frac{p^2}{T^2} \right) \quad [17]$$

Variación de la tensión con la temperatura. —

Recordemos que siendo α el coeficiente de dilatación lineal de un metal, la longitud l de un hilo se convierte en l' cuando la temperatura aumenta en Δt grados.

Al aumentar la temperatura, el hilo se dilata y se reduce su tensión.

La nueva tensión T' , se relaciona con la tensión antigua T , mediante la fórmula

$$T' = \frac{ap'}{\sqrt{a^2 \frac{p^2}{T^2} + 24 \alpha \Delta t}} \quad [18]$$

El valor de T' es real y decreciente siempre que Δt sea positivo, y así debe ser puesto que para los efectos de tensión de los conductores, no hay inconveniente en que la temperatura aumente. En cambio, cuando Δt es negativo, el valor de T' es creciente y puede llegar a ser infinito o imaginario

indicándonos la imposibilidad de alcanzar tensiones superiores a la de ruptura.

Variación del coeficiente de seguridad. — Llamando $1/n$ y $1/n'$ a los coeficientes de seguridad correspondientes a las tensiones T y T' tendremos una relación entre ellos, que resuelta respecto a n' nos da

$$n' = \frac{p}{p'} \sqrt{n^2 + 24 \left(\frac{sq}{p} \right)^2 \alpha \frac{\Delta t}{a^2}}$$

y teniendo en cuenta que $p = s \delta : 1000$ kilogramos tendremos

$$n' = \frac{p}{p'} \sqrt{n^2 + 24 \left(1000 \frac{q}{\delta} \right)^2 \alpha \frac{\Delta t}{a^2}} \quad [19]$$

Se ve, como antes, que el coeficiente de seguridad para temperaturas decrecientes puede hacerse imaginario, en cambio, para temperaturas crecientes, es siempre real y creciente.

Efecto de la elasticidad. — Llamaremos *coeficiente de elasticidad* ε , al alargamiento que experimenta un hilo de un metro de longitud y un milímetro cuadrado de sección, cuando se le somete a un esfuerzo de tracción de un kilogramo. Es evidente que este alargamiento crece con la longitud l del hilo y con la tensión T , pero decrece con la sección s , luego un hilo de longitud l y sección s bajo la acción de un incremento de tensión ΔT , alcanzará una longitud l' dada por la fórmula

$$l' = l \left(1 + \frac{\varepsilon}{s} \Delta T \right) \quad \text{o} \quad l' - l = l \frac{\varepsilon}{s} \Delta T$$

Ecuación general de las tensiones. — Observe-mos que en el caso particular del hilo suspendido por dos puntos fijos, que es el caso de los conductores eléctricos, cuando la temperatura aumenta, aumenta la longitud del conductor, y, por lo tanto, disminuye la tensión, es decir, que los incrementos Δt y ΔT son siempre de signos contrarios, luego la fórmula general para calcular la longitud de un hilo sometido a una variación de temperatura, y como consecuencia, a una variación de tensión, será

$$l' - l = l \left(\alpha \cdot \Delta t - \frac{\varepsilon}{s} \Delta T \right)$$

Las dos tensiones, T y T' , correspondientes a una variación Δt de temperatura, se relacionan mediante la fórmula

$$\frac{a^2}{24} \left(\frac{p'^2}{T'^2} - \frac{p^2}{T^2} \right) = \alpha \Delta t - \frac{\varepsilon}{s} (T - T') \quad [20]$$

Esta ecuación es de difícil solución algebraica: En la práctica podremos emplearla de dos maneras. 1.º, prescindiendo del efecto de elasticidad, es decir, suponiendo $\varepsilon = 0$, con lo cual volvemos a la ecuación hallada al estudiar la variación de la tensión con la temperatura y obtendremos valores para las tensiones, que pecarán por exceso de prudencia y no ofrecerán peligro alguno; 2.º, como comprobación de resultados, resolviéndola respecto a Δt ,

es decir, empleándola para determinar qué variación de temperatura debe sufrir un hilo para que su tensión pase de un valor T a otro T' previamente fijados.

Resuelta la ecuación en Δt es

$$\Delta t = \frac{a^2}{24\alpha} \left(\frac{p'^2}{T'^2} - \frac{p^2}{T^2} \right) + \frac{\varepsilon}{\alpha s} (T - T') \quad [21]$$

Si se fija la tensión del hilo por el coeficiente de seguridad, tendremos

$$\Delta t = \frac{a^2}{24\alpha q^2 s^2} (p'^2 n'^2 - p^2 n^2) + \frac{\varepsilon q}{\alpha} \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n'} \right) \quad [22]$$

En la práctica, y sobre todo en países como España, donde no se alcanzan temperaturas mínimas exageradas, se prescinde de las sobrecargas mecánicas y se consideran siempre $p = p'$. Con esta hipótesis, las fórmulas [21] y [22] se convierten en

$$\Delta t = \frac{a^2 p^2}{24\alpha} \left(\frac{1}{T'^2} - \frac{1}{T^2} \right) + \frac{\varepsilon}{\alpha s} (T - T') \quad [23]$$

o bien:

$$\Delta t = \frac{a^2 p^2}{24\alpha q^2 s^2} (n'^2 - n^2) + \frac{\varepsilon q}{\alpha} \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n'} \right)$$

Si en esta última sustituimos p por su valor conocido $s\delta : 1000$, obtendremos

$$\Delta t = \frac{a^2 \delta^2}{24 \times 10^6 q^2 \alpha} (n'^2 - n^2) + \frac{\varepsilon q}{\alpha} \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n'} \right) \quad [24]$$

Caso de soportes con desnivel. — Hasta aquí hemos deducido todas las fórmulas relativas al cálculo

lo de las líneas aéreas, suponiendo que los dos soportes sucesivos que limitan un vano, están siempre a igual altura.

Pueden aplicarse todas las fórmulas, al caso de apoyos a desigual altura, sin más que substituir en todas ellas las equivalencias siguientes:

$$\begin{aligned} a &= x - x' & a^2 &= 4(x^2 + x x' + x'^2) \\ a^3 &= 4(x^3 - x'^3) \end{aligned} \quad [25]$$

Fórmulas prácticas. — Los tres metales empleados hoy en la construcción de líneas eléctricas son el hierro, el cobre y el aluminio y los coeficientes correspondientes a estos metales, que intervienen en las fórmulas establecidas, son los contenidos en el cuadro de las páginas 112 y 113.

Si los conductores que se hubieran de manejar tuviesen otras constantes, será fácil preparar las fórmulas correspondientes, siguiendo los mismos métodos, y teniendo en cuenta las relaciones que ligán los diversos coeficientes numéricos contenidos en las fórmulas. Resolveremos algún ejemplo numérico de preparación de fórmulas para un metal dado.

EJEMPLO 1.º *El cable de trabajo de un tranvía se apoya en soportes de igual altura; debe templantarse con un coeficiente de seguridad $\frac{1}{5}$, y se admite una flecha máxima de 0'30 metros. ¿Cuál debe ser la longitud del vano?*

Empleando la fórmula [11'] del cuadro, tendremos:

$$a^2 = \frac{f}{E n} = \frac{0'3}{25 \times 10^{-6} \times 5} = 2400 \quad a = 48 \text{ m}$$

EJEMPLO 2.º *Un conductor de aluminio, debe salvar un vano real de 100 metros y desnivel de 30 metros, debiendo templarse con un coeficiente de seguridad $\frac{1}{6}$. Se desea conocer el vano virtual, la flecha y la longitud de conductor.*

De la fórmula [12'] sacaremos

$$a = \frac{d}{F r n} + r = \frac{30}{65 \times 10^{-6} \times 100 \times 6} + 100 = 870$$

la fórmula [11'] nos dará la flecha

$$f = 16 \times 10^{-6} \times 870^2 \times 6 = 72 \text{ metros.}$$

Las [1] y [2] nos harán conocer las abscisas de los soportes

$$x = \frac{a}{2} = 435 \qquad x' = \frac{a}{2} - r = 335$$

y, finalmente, la [15'] nos dará

$$l = 100 + 2816 \times 10^{-12} (435^3 - 335^3) \times 6^2 = 104.$$

EJEMPLO 3.º *Un conductor de cobre, se apoya en postes sin desnivel separados unos de otros 200 metros. Cuando se instala, reina una temperatura 30 grados mayor que la mínima que ha de soportar. ¿Con qué coeficiente debe templarse para que cuando llegue la temperatura mínima, tengamos un coeficiente de seguridad 1 : 4?*

La fórmula [19'] nos dará

$$n' = \sqrt{4^2 + 8430 \frac{30}{200^2}} = 4'72$$

y el coeficiente de seguridad en el momento de instalarlo, será

$$\frac{I}{n} = \frac{I}{4'72}$$

EJEMPLO 4.^o Una línea de cobre, se apoya en postes separados unos de otros 200 metros y no sufre sobrecarga mecánica alguna. Al instalarlo se temple con un coeficiente de seguridad $\frac{1}{5}$ y se desea calcular el descenso de temperatura necesario para que la tensión suba hasta alcanzar un coeficiente de seguridad $\frac{1}{4}$.

Substituyendo valores numéricos en la fórmula [24']

$$\Delta t = \frac{200^2}{8430} (5^2 - 4^2) + 180 \left(\frac{I}{4} - \frac{I}{5} \right) = 51 \text{ grados.}$$

EJEMPLO 5.^o Resolver el mismo ejemplo anterior cuando los soportes presentan un desnivel $d = 30$ m.

Calcularemos el vano virtual por la fórmula [12']

$$a = \frac{d}{F r n} + r = \frac{30}{10^{-6} \times 110 \times 200 \times 5} + 200 = 472$$

Las coordenadas de los soportes, son [1] y [2],

$$x = \frac{472}{2} = 236 \quad x' = \frac{472}{2} - 200 = 36$$

la fórmula [25] nos da

$$a^2 = 4 (236^2 + 236 \times 36 + 36^2) = 65488$$

y, finalmente, la fórmula [24'] será

$$\Delta t = \frac{65488}{8430} (5^2 - 4^2) + 180 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{5} \right) = 79 \text{ grados.}$$

EJEMPLO 6.º *Estudiar las tensiones de un hilo en una antena para radiotelegrafía, que tiene forma de paraguas, con un radio $r = 30$ y una altura o desnivel $d = 70$.*

Los hilos son de bronce silicioso, con las características siguientes:

$$\delta = 8 \quad q = 100 \quad \alpha = 0,00002 \quad \varepsilon = 0,00008 \quad s = 20$$

Utilizando las relaciones consignadas en la segunda columna del cuadro de fórmulas, calcularemos fácilmente los coeficientes correspondientes a este hilo:

$$\begin{array}{lll} A = 8 \times 10^{-3} & B = 8 \times 10^{-5} & C = 4 \times 10^{-5} \\ D = 8 \times 10^{-5} & E = 10^{-5} & F = 4 \times 10^{-5} \\ G = 1066 \times 10^{-12} & H = 266 \times 10^{-12} & I = 64 \times 10^{-10} \\ J = 48 \times 10^{-5} & K = 75000 & L = 48 \times 10^{-5} \\ M = 4 & N = 75000 & P = 400 \end{array}$$

El peso por unidad de longitud, será [9']

$$p = 8 \times 10^{-3} \times 20 = 0'16 \text{ Kg.}$$

Para que el hilo no baje más que el soporte inferior, haremos que ambos soportes estén a un mismo lado del vértice y, para ello, fijaremos el vano virtual con la condición [3]:

$$a > 2 \times 30 \qquad a = 180$$

En el vértice, tendremos la tensión virtual [6]

$$T = \frac{0'16 \times 30 (180 - 30)}{2 \times 70} = 5 \text{ kgs.}$$

y el coeficiente de seguridad será

$$\frac{1}{n} = \frac{T}{qs} = \frac{5}{2000} = \frac{1}{400}$$

La flecha, según la fórmula [11']

$$f = 10^{-5} \times 180^2 \times 400 = 130 \text{ m.}$$

las coordenadas de los apoyos serán [1] y [2]

$$A (x = 90, y = 130) \quad B (x = 60, y = 60).$$

Las tensiones en los apoyos [13]:

$$T_A = 5 + 0'16 \times 130 = 25'8$$

$$T_B = 5 + 0'16 \times 60 = 14'6$$

y sus componentes horizontales y verticales

$$H_A = \frac{T' T}{\sqrt{T^2 + p^2 x^2}} = \frac{258 \times 5}{\sqrt{5^2 + 0'16^2 \times 90^2}} = 8'46 \text{ kg.}$$

$$V_A = \frac{5 \times 0'16 \times 90}{\sqrt{5^2 + 0'16^2 \times 90^2}} = 27'37$$

$$H_B = \frac{14'6 \times 5}{\sqrt{5^2 + 0'16^2 \times 60^2}} = 6'75.$$

$$V_B = \frac{14'6 \times 0'16 \times 60}{\sqrt{5^2 + 0'16^2 \times 60^2}} = 13$$

Estas tensiones nos servirán para calcular la torre central que sostiene el paraguas y el círculo que sostiene su borde inferior.

Finalmente, la longitud del hilo será [15']

$$l = 90 - 30 + 1,066 \times 10^{-12} (90^3 - 30^3) \times 400^2 = 76 \text{ m.}$$

FÓRMULAS	RELACIÓN ENTRE COEFICIENTES	COEFICIENTES		
		Hierro	Cobre	Alum. ^o
$q =$		36	40	20
$\alpha =$	$10^{-6} \times$	12	17	23
$\varepsilon =$	$10^{-6} \times$	54	78	16
$\delta =$		7'5	8'9	2'57
$q : \delta =$		4'8	4'5	7'7
$p = A \varepsilon$	$A = 8 \times 10^{-3} = 10^{-1} \times$	75	89	25'7
$\phi : T = Bn$	$B = A : q = 10^{-5} \times$	20	22	13
$y = Cn x^2$	$C = B : 2 = 10^{-5} \times$	10	11	11
$\text{tang } \theta = Dn x$	$D = B = 10^{-5} \times$	20	22	13

[9']

[10']

[4']

[14']

[11']	$f = E a^2 n$	25	25	16
[12']	$d = F r n (a - r)$	100	110	65
[15']	$l = x - x' + G (x^3 - x'^3) n^2$	6666	8066	2816
[16']	$l = a + H a^3 n^2$	1666	2016	704
[18']	$T' = \frac{ap'}{\sqrt{I a^2 n^2 + J \Delta t}}$	400	484	169
[19']	$n' = \frac{\phi}{\phi'} \sqrt{n^2 + K \frac{\Delta t}{a^2}}$	288	408	552
[21']	$\Delta t = \frac{a^2}{L} \left(\frac{\phi'^2}{T'^2} - \frac{\phi^2}{T^2} \right) + \frac{M}{S} (T - T')$	7100	8430	32662
[24']	$\Delta t = \frac{a^2}{N} (n'^2 - n^2) + P \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n'} \right)$	288	408	552
		4'5	4'5	7
	$N = K = J : B^2$	7100	8430	32662
	$P = Mq =$	162	180	140

[11']

[12']

[15']

[16']

[18']

[19']

[21']

[24']

CAPÍTULO V

CANALIZACIONES SUBTERRÁNEAS

Generalidades. — Las canalizaciones eléctricas enterradas son siempre urbanas, y en las grandes ciudades tropiezan con múltiples dificultades, debido al gran número de instalaciones del subsuelo, como son el alcantarillado, las distribuciones de agua, de gas, etc., y aun más difícil que instalar, es el conservarlas en buen estado, a través del constante remover tierras, para las frecuentísimas reparaciones, ampliaciones y modificaciones de las distintas redes.

En las poblaciones modernas, se construye un túnel o alcantarilla seca, en el cual se instalan cómodamente las redes clasificadas de utilidad pública, como son la corriente de luz y fuerza, el agua, el gas, los hilos telegráficos y los telefónicos.

Este túnel ha de ser de dimensiones adecuadas, para que por él pueda circular cómodamente un hombre, y así se puedan hacer trabajos en las redes sin abrir las molestas zanjas en las calles, que impiden muchas veces hasta la circulación rodada. Barcelona, en su reforma del casco viejo, prepara ya así sus alcantarillas.

En poblaciones donde no existen estas alcanta-

rillas, las instalaciones eléctricas subterráneas están clasificadas en los tres tipos siguientes:

1.º El sistema empleado desde muy antiguo por la Dirección de Telégrafos, cuando los cables no tienen gran diámetro y en cambio tienen suficiente flexibilidad, consiste en disponer enterrado en la calle, un conducto rígido de fundición, cemento o asfalto, interrumpiéndolo de trecho en trecho con pozos de mampostería o de fundición.

Los conductores se depositan en el fondo de estos tubos, y los segmentos correspondientes a la separación de pozo a pozo, se empalman unos con otros mediante juntas especiales.

El agua, que puede penetrar en los tubos, se recoge en huecos repartidos de trecho en trecho, para extraerla, cuando convenga, mediante una bomba. Si el terreno fuese muy permeable, bastaría hacer algunos orificios en el fondo del tubo.

Este procedimiento de los pozos de registro, permite, en cualquier momento, poner o quitar un conductor en el tubo, si bien con el peligro de que se roce algún cable durante el tendido.

Pueden siempre emplearse cables de cobre con secciones inferiores a 2 centímetros, montando varios de ellos en paralela, cuando la intensidad de servicio lo exija.

2.º El método de los *cables armados*, consiste en recubrir el conductor de cobre, de envolturas aisladoras de espesor proporcional a la tensión de servicio, y proteger el cable mediante una armadura constituída por cintas de hierro, o por alambres del mismo metal.

3.º Otro procedimiento empleado en estas canalizaciones, consiste en emplear *conductores desnudos, sostenidos por aisladores*, situados en los canales subterráneos.

Estos canales se interrumpen de trecho en trecho con registros o bocas, en donde se hacen los empalmes, y en cuyo fondo se dispone un recipiente para recoger las aguas filtradas. El desagüe se hace mediante bombas, o mediante comunicación con el alcantarillado.

Con este procedimiento, se suprime el empleo de envolturas aisladoras, que son la parte de la canalización que más fácilmente se deteriora. En cambio, el sistema no es aplicable en el caso de grandes tensiones. Los conductores desnudos, con grandes tensiones, fácilmente ocasionarían chispazos, puesto que han de estar bastante juntos unos de otros.

El método de los cables armados es el más económico y ha sido, por ello, el preferido para distribuciones de alumbrado.

El procedimiento de llevar los conductores, aislados o desnudos, por canales subterráneos, puede constituir serio peligro. Estos canales, si contienen tuberías de gas, acaban por llenarse de mezcla detonante y una leve chispa que se produzca en su seno, ocasionada por la ruptura de un circuito eléctrico, puede ser causa de fuerte explosión.

Parece natural enterrar las canalizaciones en el eje de las calles, para que equidiste de las casas de ambas aceras; pero con tal situación, para un nuevo empalme o para una reparación cualquiera, habrá

que interrumpir, parcial o totalmente, la circulación rodada.

Para evitar este inconveniente, en las grandes ciudades, Barcelona entre ellas, se han instalado dos canalizaciones en cada calle, bajo sus dos aceras.

Para los cruces de calles, se disponen los cables en tubos o canales, de manera que puedan substituirse tirando de ellos por uno de sus extremos.

Tubos y canales. — Para las canalizaciones subterráneas instaladas en tubos, se emplean tubos protectores de hierro o de fundición, o bloques de asfalto con canales semicilíndricos, que al superponerse, dejan huecos cilíndricos en forma tubular.

Los tubos metálicos deben alquitranarse, para evitar su oxidación, y deben vigilarse sus superficies interiores, para que no tengan rugosidades cortantes, procedentes de defectos de fundición, que pudieran rasgar las cubiertas de los cables, al hacerlos resbalar por su interior.

Los tubos sucesivos se enchufan unos dentro de otros, protegiendo los empalmes mediante estopas impregnadas de minio.

La sección de los tubos, debe ser *por lo menos* séxtuple de la precisa para contener los cables que deben ir en él.

Las cajas de registro se disponen sobre la línea de cables, distanciadas unas de otras, de 60 a 100 metros.

Estas cajas de registro son verdaderos pozos, de tamaño suficiente para que en ellos quepa cómodamente un hombre, que tire de los cables durante la

instalación y reposición, y que haga los empalmes de unos segmentos con otros. Las cajas se terminan en la superficie de la acera mediante una boca de hierro, y su tapadera de las formas indicadas en la

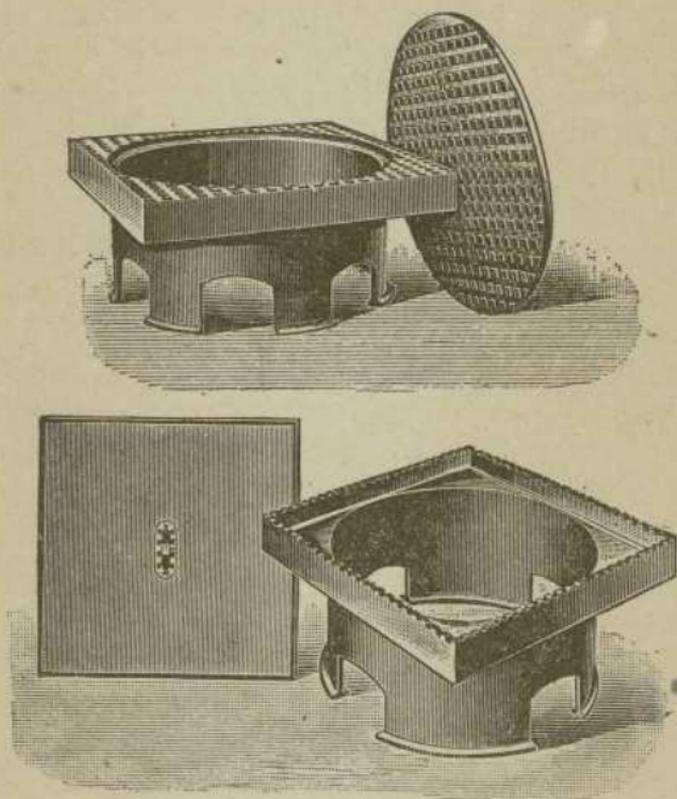


Fig. 18

figura 18. Las paredes del pozo se recubren de mampostería y cemento, para hacerlas impermeables.

Cables. — Los cables empleados en estas instalaciones comprenden un alma de cobre, formada

por un cordón flexible de hilos delgados; una serie de cubiertas aislantes, y si éstas no son impermeables, una capa impermeable, formada generalmente de plomo.

Cuando el aislante es de caucho, se dispone entre el cobre y el caucho una capa de algodón, que sirva de mullido para que los hilos metálicos, al doblarse, no rompan el aislante. Sobre el algodón se arrollan sucesivamente capas de caucho natural, caucho vulcanizado y trencillas cauchotadas.

Por lo caro del caucho, se substituye muchas veces por el algodón o el yute impregnados, en caliente, de parafina o resina. En este caso, el aislante debe alcanzar un espesor de 5 a 6 milímetros por cada 3000 voltios.

Tendido de cables. — Enterrados los tubos que van a contener los cables, y dispuestas las cajas de registro para principiar el trabajo de tendido, se pasa por cada tramo de tubo una cuerda fuerte destinada a pasar los cables.

Las cuerdas se pasan mediante sondas de acero, que son hilos templados que al desenrollarse de un carrete, tienen bastante rigidez para marchar rectos a lo largo del tubo, empujándoles por su extremo. El extremo que avanza, podría tropezar fácilmente en una junta de tubos, y para evitarlo se termina la sonda en una bola, que pueda salvar fácilmente ligeras desigualdades de la superficie.

Llegada la sonda a la caja de registro próxima, se ata la cuerda a la bola, y tirando de la sonda,

queda pasada la cuerda. Del mismo modo, pasa el cable con el auxilio de la cuerda.

Cuando un tubo ha de contener varios cables, es preciso pasarlos a la vez todos ellos. Si se pasan sucesivamente, el roce de los que entran con los entrados ya, deteriora seguramente las cubiertas protectoras respectivas.

Conviene evitar cuanto se pueda los empalmes, empleando trozos de cable de la mayor longitud posible. Para ello se coloca el carrete de cable, próximo a la boca de la primera caja de registro; se pasa el cable, como hemos dicho, por el primer segmento de tubo y en cuanto sale su extremo por la segunda caja, se principia el tendido a través del segundo segmento de tubo. Continuando así, se logra pasar todo el carrete, sin corte alguno.

Los cables se entierran a una profundidad mínima de 60 centímetros y a una distancia no menor de 50 centímetros de las tuberías de agua, de gas o de otros servicios preexistentes. Esta separación se eleva a un metro en los cruces con cables destinados a las comunicaciones telefónicas o telegráficas.

Empalmes. — Tendidos ya los cables y asomando sus extremos a las cajas, debe procederse a empalmarlos. Los empalmes deben hacerse con el mayor esmero. Muchas veces, buenos cables dieron malos resultados por ser malos los empalmes.

Deben empalmarse por *obreros empalmadores*, los más acreditados como cuidadosos, de modo que su fama sea garantía de su buen trabajo.

Para efectuar un empalme de cables con aislamiento de caucho, se empieza por desnudar en ambos extremos las cubiertas de plomo en una longitud de 6 a 7 centímetros y las cubiertas aisladoras en 2 a 2'5 centímetros.

Los dos extremos desnudos se meten en un manguito de cobre y soldados a la resina. Si en el mismo punto del empalme se debe sacar una derivación, se usa un manguito en forma de T, en el cual se meten los tres cabos desnudos.

Las soldaduras de cobre se protegen de los contactos con tierra mediante capas sucesivas de caucho, intercalando entre ellas un disolvente del caucho, como la bencina, para asegurar la adherencia.

Se recubre el empalme con una lámina de plomo que se une a los plomos de los cables mediante cintas alquitranadas o embetunadas.

Cables armados. — Cuando los cables van a instalarse directamente enterrados, deben extremarse las cubiertas protectoras, que constituyen sus *armaduras*.

En la fábrica que la «Compañía general de cables» posee en Cornellá (Barcelona), se constituyen los cables armados, poniéndoles el alma de cobre formada por muchos conductores de un milímetro próximamente de diámetro; esta cuerda se aísla recubriéndola de cintas de papel, en mayor o en menor número, según la tensión a que va a funcionar; la cuerda aislada única o las diversas cuerdas que van a formar el cable, se reúnen mediante una envol-

tura de yute impregnada en arcilla; se le pone luego el forro de plomo, protector contra la humedad; se pone sobre el plomo una nueva capa de yute a manera de mullido y, finalmente, se pone la armadura, constituída por dos bandas de acero arrolladas en hélice, y cuidando que recubran exactamente toda la superficie del cable. Todavía la armadura se protege nuevamente con otra capa de yute embetunada.

En la figura 19 se representan seis secciones diferentes de otros tantos cables armados construídos por la «Société Industrielle des Téléphones», de París. El número 1 corresponde a un solo conductor, el 2 contiene dos conductores iguales, el 3 contiene dos conductores concéntricos, disposición indicada para corrientes alternas simples; el 4 contiene dos conductores de sección s y uno de sección $\frac{1}{2}s$, dispuestos para líneas trifilares; el 5 está destinado para una línea trifásica, el 6 es una línea múltiple, telegráfica o telefónica.

En la fábrica de Cornellá, antes citada, hemos visto preparar cables especialmente destinados al servicio de *feeders* o *alimentadores* (ver el tomo XIV), conteniendo el número de conductores que exija la línea, más otros tantos, de poquísima sección, que sirvan para hilos pilotos (fig. 20).

También hemos visto allí cables trifásicos, cuyas almas de cobre, en lugar de formar tres círculos, como el 5 de la figura 19, forman tres sectores de 120° , que aprovechan mejor la sección circular total del cable.

Estos cables, llamados *sectorales*, contienen me-

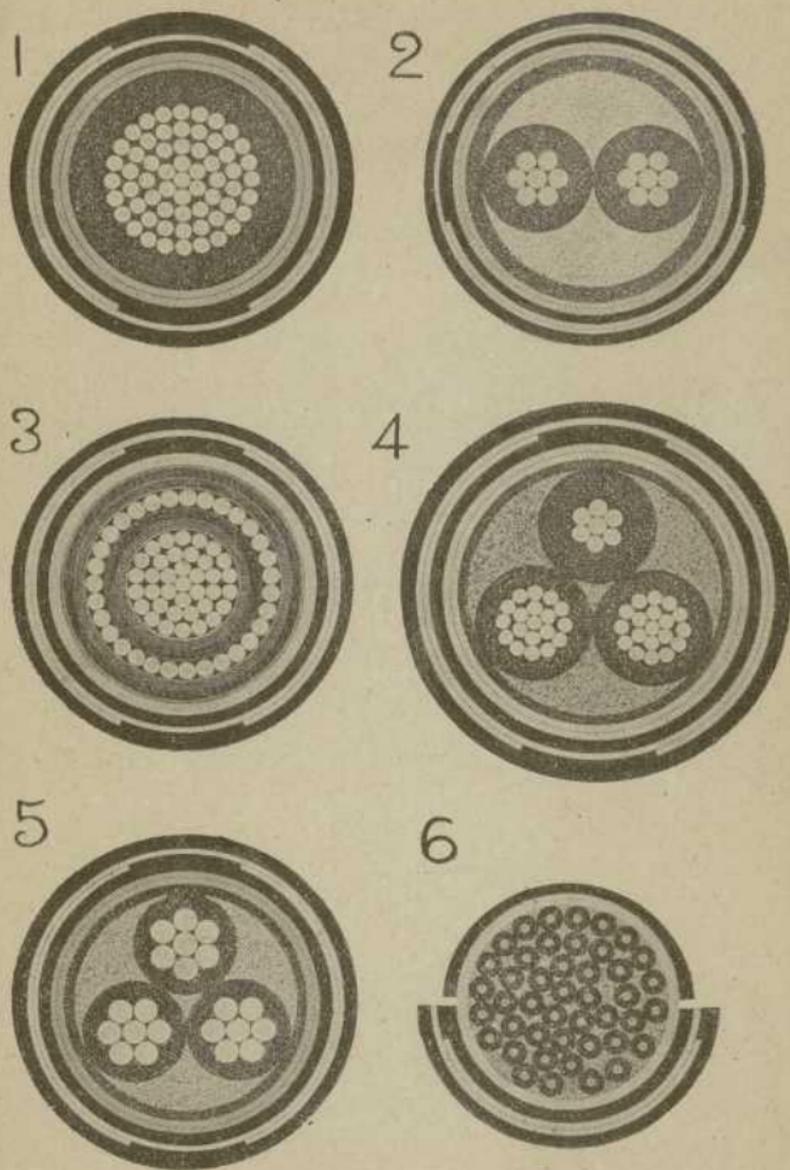


Fig. 19

nos aislante para igual rigidez dieléctrica y son en total menos voluminosos.

Los cables armados, se entierran sin más precaución que la de rodearlos de arena o tierra fina.

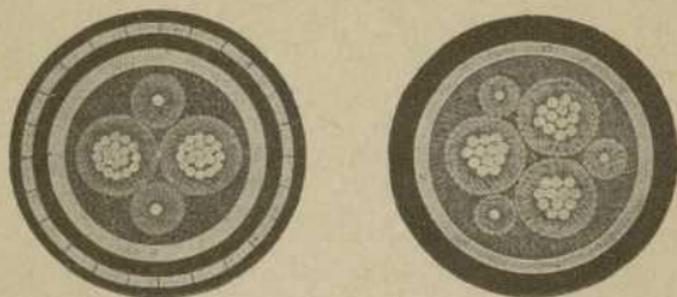


Fig. 20

Sobre los cables armados y la arena que los envuelve, se pone una serie de ladrillos que los protege de los picotazos cuando se abran zanjas transversales.

Cajas de empalme. — Las uniones entre cables armados se efectúa mediante las cajas de empalme representadas en la figura 21.

Estas cajas son de fundición, compuestas, cada una, de dos piezas simétricas, 1 y 2.

En la inferior se sujetan los extremos de los cables que llegan a la caja, y se establecen las uniones entre ellos, mediante hilo o láminas de plomo que actúen de fusibles.

Cerrada la caja, uniendo con tornillos de presión las piezas 1 y 2, se rellena su interior del aceite

especial empleado para transformadores. En la cubierta 1, se ve el orificio destinado a entrada del aceite.

La figura 22 representa una caja para derivaciones de cables trifásicos, y a su lado la correspondiente tapadera.

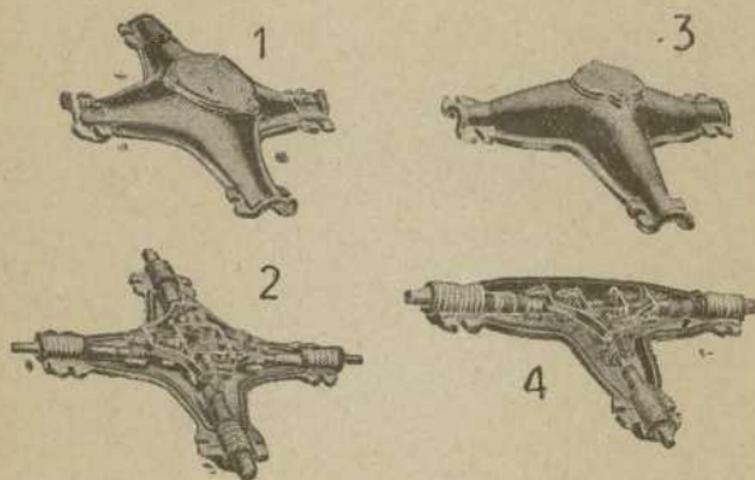


Fig. 21

La unión de alimentadores con distribuidores se efectúa en cajas de este tipo, y mediante láminas fusibles, que sobresalen del aceite aislador.

Entre el alma del cable y la lámina fusible, no hay soldadura alguna, y únicamente se toma la precaución de estañar los extremos de los cobres, para evitar la oxidación.

Canalizaciones subterráneas con conductores desnudos. — Mr. Crompton fué el primero a quien se

le ocurrió la supresión de las capas aisladoras de los cables eléctricos, apoyando éstos sobre los aisladores situados en el fondo de una canal. Puede decirse que este procedimiento realiza una línea aérea, situada en el fondo de una canal.

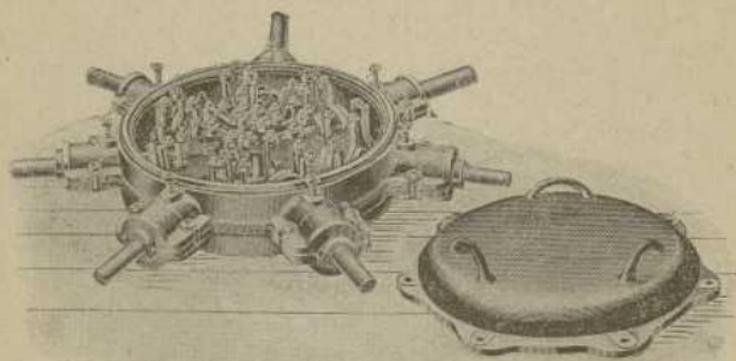


Fig. 22

Los conductores son bandas de cobre, de sección rectangular, apoyadas por su canto, en aisladores de la forma representada en la figura 6.^a

Los aisladores se atornillan, mediante el hierro que llevan, en travesaños de madera, situados en el fondo de la canal.

Las bandas de cobre son de 2'5 centímetros de ancho, por 6 milímetros de grueso y 210 metros de longitud. Si la línea exige mayores secciones, se suman en paralela las bandas precisas.

Los canales están interrumpidos, de trecho en trecho, por registros, como el representado en la

figura 23, y de estos registros salen las acometidas para las casas, mediante cables aislados con caucho, forrados de tubos de plomo.

El sistema de canales ha sido empleado en algunas poblaciones. Tiene el inconveniente de las

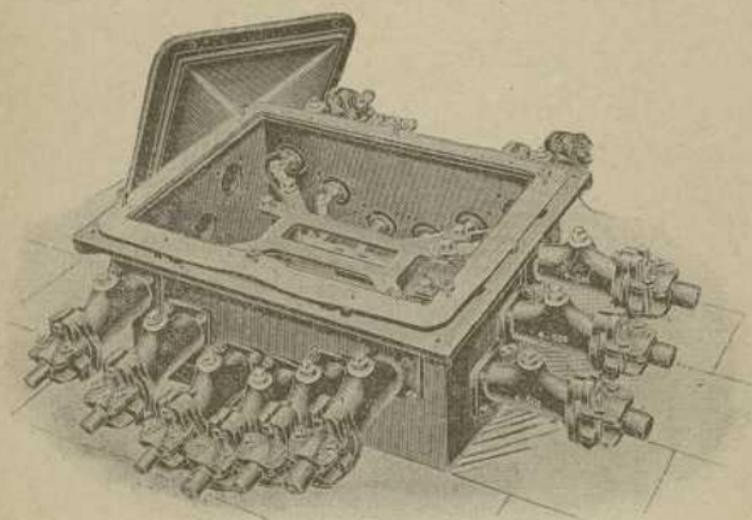


Fig. 23

filtraciones de agua que en momentos de tormentas o lluvias torrenciales, no pueden agotarse con suficiente rapidez, y si el agua alcanza a los conductores, se producen cortos circuitos, o por lo menos abundantes desprendimientos de hidrógeno, con todos los peligros de la existencia de mezclas detonantes.

CAPÍTULO VI

PRUEBAS DE LAS LÍNEAS

Objeto de las pruebas. — Los elementos principales que conviene conocer, para apreciar el estado eléctrico de una línea, son la resistencia, la auto-inducción, la capacidad, la inducción mutua entre sus conductores y el aislamiento. Todos estos elementos influyen notablemente en la intensidad de la corriente que circula, en las cargas estáticas que adquiere la línea y en el factor de potencia que imponen a la transmisión de energía.

Las líneas enterradas y sumergidas exigen aún mayores cuidados no sólo durante su explotación, sino ya durante la fabricación de sus cables y durante su tendido.

Resistencia de una línea. Método de sustitución.
Para medir muy aproximadamente la resistencia de una línea aérea, se puede emplear un método sencillo, llamado de sustitución, que consiste en formar un circuito con una pila P (fig. 24), un galvanómetro G y la línea L , y anotar cuidadosamente la desviación de G . Pasando el conmutador C a la posición 2, se varía la resistencia R , hasta

conseguir en G la misma desviación anotada anteriormente.

Es evidente que de este modo puede asegurarse que

$$L = R$$

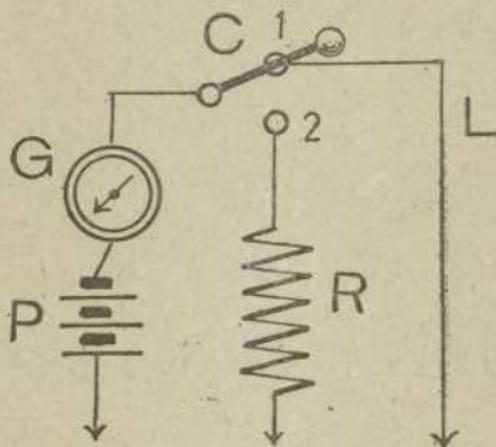


Fig. 24

Método del galvanómetro diferencial. — Tomemos un galvanómetro diferencial, es decir, un galvanómetro provisto de dos devanados iguales y de sentido contrario, cuyos efectos se restan sobre la aguja imantada.

Emitamos corriente de una pila P (fig. 25) por la entrada común de ambos circuitos, empalmando a las salidas, la resistencia variable R en uno, y la línea L en otro.

Actuemos sobre R hasta que la aguja del galvanómetro permanezca en el cero, y cuando esto se consiga, indicará que son iguales las intensidades

en ambos circuitos y, por lo tanto, iguales también las resistencias

$$L = R$$

Resistencia de una línea de telecomunicación. — Cuando se desea medir la resistencia de una línea telegráfica, puede operarse por cualquiera de los

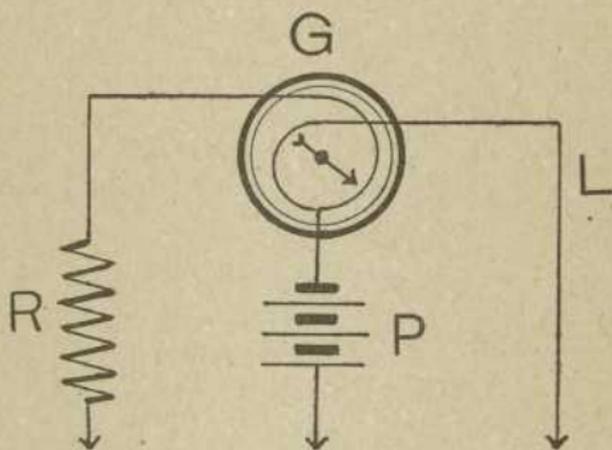


Fig. 25

métodos anteriores; pero teniendo en cuenta que generalmente el hilo cierra su circuito a través de la tierra.

Por ejemplo: si se adopta el método del puente de Wheatstone, las conexiones serán las indicadas en la figura 26, que son las mismas establecidas en el tomo I, página III, figura 29, con la variante de ser tierra el vértice 4 de aquella figura, que aquí está partido en p y H .

Línea con dos o más conductores. — El método anterior supone que la línea lleva un solo conductor.

Si existen en línea dos conductores, se podrá medir la resistencia del anillo formado por el conjunto de los dos conductores, sin el empleo de la tierra; y si existiesen más de dos conductores, podrá conocerse la resistencia de cada uno de ellos, sin recurrir tampoco al empleo de la tierra.

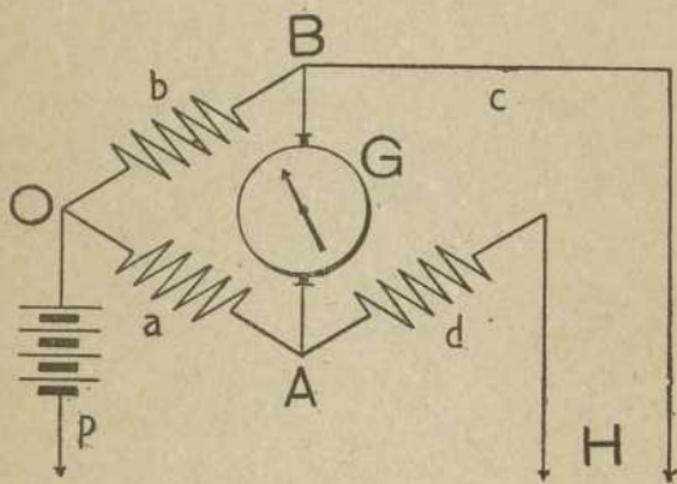


Fig. 26

En efecto; sean x , y , z , las resistencias de los tres conductores que supondremos existiendo en la línea.

Formemos anillos combinándolos de dos en dos, y midamos las resistencias de los tres anillos formados. Hallaremos

$$x + y = p \quad y + z = q \quad z + x = r$$

y resolviendo el sistema de ecuaciones

$$x = \frac{p + r - q}{2} \quad y = \frac{p + q - r}{2} \quad z = \frac{q + r - p}{2}$$

De un modo análogo se aplican a las líneas los métodos del galvanómetro diferencial y de sustitución.

Medida de la autoinducción de una línea.—Sean *A* y *B* (fig. 27) los extremos de los conductores que forman una línea, que pueden ponerse en anillo

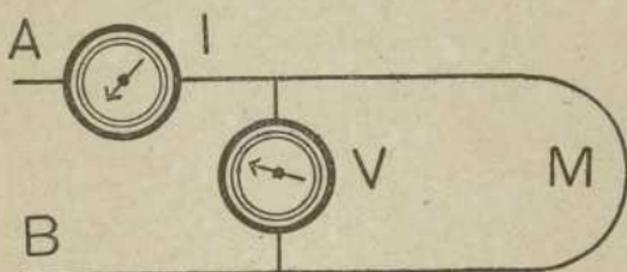


Fig. 27

en su extremo *M*. Hagamos circular por este anillo una corriente alterna, cuyas constantes eficaces de intensidad y tensión, podamos medir exactamente mediante el amperímetro *I* y el voltímetro *V*.

Entre estas constantes, existe la relación

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

según hemos visto en el tomo II, página 52, y resolviendo la ecuación respecto a \mathcal{L} tendremos:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{V^2}{I^2} - R^2}$$

(Recordemos que $a = 2 \pi f$, como se vió en el tomo II, página 25).

Bastará substituir en esta fórmula los valores V , I , R , determinados por la experiencia, para obtener Ω .

Método de los voltímetros. — Puede procederse de otro modo para evitar la medición de I , midiendo únicamente diferencias de potencial eficaces.

En serie con la línea que se ensaya, montemos una resistencia R' , sin autoinducción, y como la intensidad será la misma en ambas partes del circuito, tendremos

$$\frac{V}{\sqrt{R^2 + a^2 \Omega^2}} = \frac{V'}{R'} \quad \text{o} \quad \Omega = \frac{1}{a} \sqrt{\left(\frac{V}{V'}\right)^2 R'^2 - R^2}$$

siendo V y V' las diferencias de potencial en los bornes de la línea y de la resistencia respectivamente.

Método del galvanómetro diferencial. — Hagamos comunicar uno de los circuitos del galvanómetro (figura 28) con una capacidad variable C , shuntada por la resistencia r , y en serie con la L , cuya autoinducción quiere medirse. El otro circuito se hace comunicar con un reóstato variable R .

Cerrando el interruptor M , durante algunos segundos para que se establezca el régimen permanente de la pila, y actuando luego sobre el reóstato R , se podrá equilibrar el sistema de ambos circuitos, en régimen normal de corriente.

Conseguido el equilibrio, se abre y cierra el interruptor M , con bastante frecuencia para provocar períodos variables en el circuito derivado rCL .

El galvanómetro acusará nuevamente un desequilibrio en sus circuitos, que trataremos de restable-

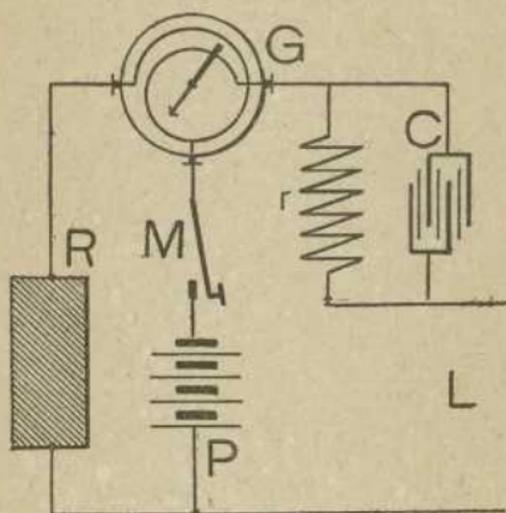


Fig. 28

cer actuando sobre la resistencia r . Cuando los movimientos del interruptor M no tengan efecto alguno sobre el galvanómetro, podrá asegurarse que la ley de Ohm se cumple durante el período variable de la corriente en el circuito rCL y, por lo tanto, tendremos

$$\mathcal{L} = cr^2$$

según vimos en el tomo II, página 66.

Medida del coeficiente de inducción mutua. — Si se conoce el coeficiente de inducción mutua de un par de carretes, es fácil deducir el correspondiente a otro par de circuitos que se induzcan el uno al otro. Para ello se construyen carretes tipos, de coeficiente \mathcal{M} perfectamente determinado.

Dispongamos el par conocido M y el desconocido M' como se indica en la figura 29, uniendo en serie

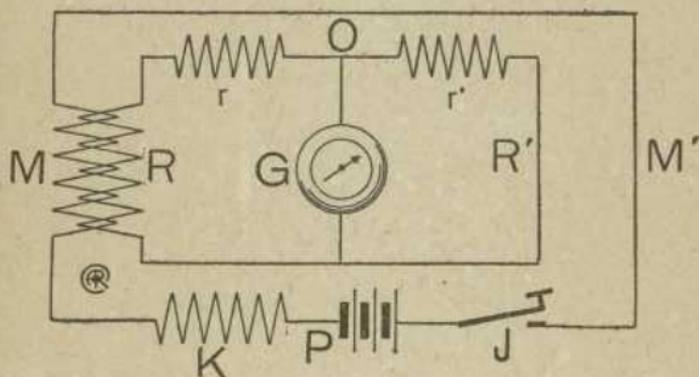


Fig. 29

sus primarios con un generador P , una resistencia K y un interruptor J ; y sus secundarios con resistencias $r r'$ variables y un galvanómetro G derivado entre ellos.

Arreglemos las resistencias $r r'$ de manera que al abrir o cerrar el interruptor J , el galvanómetro G no acusе descarga alguna y podremos asegurar que son iguales las corrientes inducidas en los dos secundarios, es decir, que las tensiones inducidas $\mathcal{M} I$ y $\mathcal{M}' I$ son proporcionales a las resistencias $R + r$ y $R' + r'$

$$\frac{\mathcal{N} I}{\mathcal{N}' I} = \frac{R + r}{R' + r'}$$

de donde

$$\mathcal{N}' = \mathcal{N} \frac{R' + r'}{R + r}$$

Medida de la capacidad. — La capacidad de un conductor se mide siempre comparándola con la de otro, que nos sea perfectamente conocida.

Para comparar las capacidades de dos conductores, basta cargarlos sucesivamente con un mismo generador de energía eléctrica y descargarlos *en seguida* sobre un mismo galvanómetro balístico (galvanómetro que sirve para medir descargas instantáneas de cantidades de electricidad. Ver tomo XVIII).

Siendo Q y Q' las cargas absorbidas por los conductores; C y C' sus capacidades relativas, y α , α' las desviaciones que producen descargando sobre el balístico, se cumplen las proporciones

$$\frac{Q}{Q'} = \frac{C}{C'} = \frac{\text{sen } \alpha/2}{\text{sen } \alpha'/2}$$

Por lo tanto, conociendo α , α' y C' será fácil conocer C .

Si los ángulos α y α' , observados en el balístico, son pequeños, podrá tomarse la fórmula aproximada

$$\frac{C}{C'} = \frac{\alpha}{\alpha'}$$

La descarga de un conductor sobre el galvanómetro ha de ser inmediatamente después de la carga. Si entre ambas maniobras transcurre algún tiempo, es muy probable que se pierda parte de la carga.

La rapidez de las conmutaciones se consigue mediante *llaves de descarga*, como la representada en la figura 30, que es el modelo Sabine, construido por la casa Carpentier.

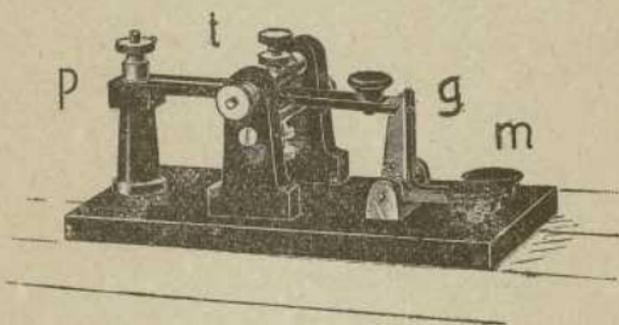


Fig. 30

Una palanca *P* fija en uno de sus extremos, puede oscilar entre dos toques *t*, fijos; pero un muelle le obliga a apoyarse constantemente en el superior. Le obligan a descender hasta el tope inferior, o a permanecer sin tocar ni a uno ni a otro, uno de dos gatillos *g* en que terminan las palancas angulares *m*.

Si la palanca de contactos se mantiene apoyada sobre el inferior por la acción del gatillo correspondiente, oprimiendo su mango, pasará rápidamente la palanca de un contacto a otro. Este es el objeto de las llaves.

Aplicación a una línea. — La línea L y un condensador tipo C (tomo I, pág. 74) se llevan a los centros de dos conmutadores circulares A y B (figura 31), completando el montaje con un galvanómetro G y un generador P .

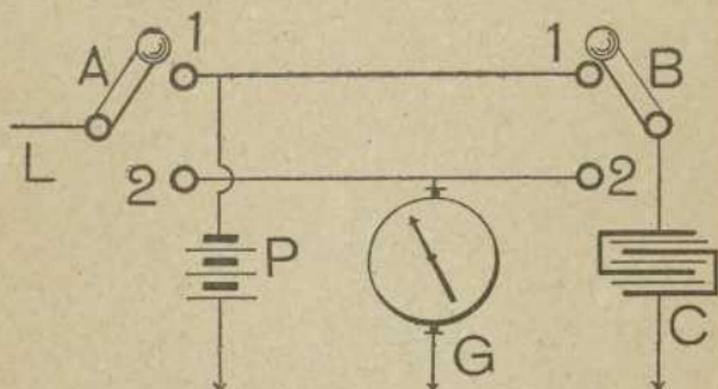


Fig. 31

Para operar, se aísla el conmutador B y se lleva la manivela del A , sucesivamente a las posiciones 1 y 2, con lo cual la línea se carga primero, y se descarga después.

Se procede luego del mismo modo, con el conmutador B , teniendo el A aislado. Con las desviaciones observadas; y el valor conocido de C , se aplica la fórmula del párrafo anterior.

Método de Faraday. — Otro medio de practicar la comparación de capacidades, es utilizando la disposición representada en la figura 32.

Poniendo el conmutador M en la posición 1, se carga la línea L , y pasando a la posición 3, se des-

carga sobre el balístico G y produce una desviación α .

Cargando nuevamente la línea, con la posición 1 y llevando el conmutador M a la posición 2, repartiremos la carga entre las capacidades L y C' . Des-

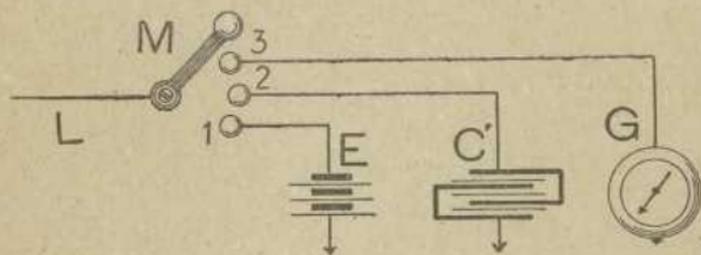


Fig. 32

cargando luego mediante la posición 3 del conmutador M , observaremos una desviación α' .

Estableciendo la proporción entre capacidades, y desviaciones, tendremos

$$\frac{L}{L + C'} = \frac{\alpha}{\alpha'}$$

y de aquí se deduce fácilmente

$$\frac{L}{C'} = \frac{\alpha}{\alpha' - \alpha} \quad \text{o} \quad L = \frac{C' \alpha}{\alpha' - \alpha}$$

Aislamiento de una línea. — La condición indispensable que debe exigirse a una línea eléctrica, de cualquier categoría, es su perfecto aislamiento. En las canalizaciones eléctricas de alguna longitud es difícil, por esmerada que sea su construcción,

evitar en absoluto las pérdidas de corriente a través de derivaciones más o menos resistentes, que la llevan a tierra o a otros conductores próximos, y en las canalizaciones aéreas es imposible evitar la pérdida de carga a través del aire, sobre todo en tiempo húmedo.

Las exigencias de aislamiento crecen con la tensión empleada. Desde el aislador sencillo, empleado en la línea telegráfica o telefónica, hasta la serie de aisladores empleada en cada uno de los soportes de una línea de alta tensión, o la serie de cubiertas aisladoras y protectoras que rodean a un cable enterrado o sumergido son imperfectas tales precauciones, y es imposible evitar por completo las derivaciones.

Cuando estas derivaciones no son debidas a causas accidentales, sino que tienen su origen en la construcción de la línea, son, en general, muy resistentes y se hallan uniformemente repartidas en toda su longitud. Para apreciar el estado de aislamiento de la línea, podremos suponer que todas las derivaciones existentes en un kilómetro de hilo, se substituyen por una sola, cuya resistencia sea igual a la resistencia compuesta de todas ellas.

La resistencia de esta derivación ficticia, toma el nombre de *aislamiento kilométrico*.

Al estudiar la resultante de varias resistencias en derivación (tomo I, pág. 94), vimos que con esta conexión la resistencia se divide, es decir, que combinando K resistencias iguales a R_k se obtiene una resistencia compuesta K veces menor

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

De donde se deduce

$$R_k = K R$$

es decir, que *el aislamiento kilométrico de un conductor es el producto de su resistencia total, por el número de kilómetros que mide.*

Medida del aislamiento de un conductor. — La determinación de la resistencia total de aislamiento R en un conductor, puede efectuarse por cualquiera de los procedimientos que estudiaremos en el tomo XVIII, para esta clase de operaciones.

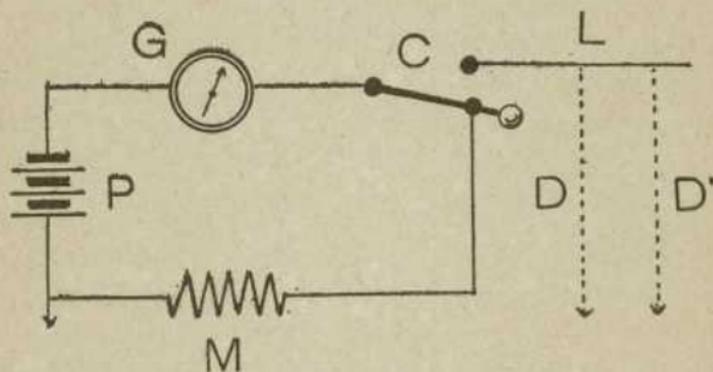


Fig. 33

En las centrales productoras o receptoras, lo mismo que en las centrales telegráficas o telefónicas, se emplean métodos simplificados, que permitan una ejecución rápida y, con preferencia, se utilizan métodos llamados de *substitución*.

Sirva de ejemplo el siguiente:

Se dispone un galvanómetro sensible G , conectado como indica el esquema de la figura 33, con una pila P , una resistencia de un megohmio M y un conmutador C .

Teniendo el conmutador en la posición del dibujo, la pila P se cerrará sobre el megohmio M y producirá una desviación d en el galvanómetro. Llevándolo sobre el otro tope, la pila cerrará su circuito por las derivaciones $D, D'...$ de la línea y producirá en el galvanómetro una nueva desviación g , es decir,

con 1 megohmio, la desviación fué d
con R es g

luego

$$\frac{d}{g} = \frac{R}{1} \quad \text{o} \quad R = \frac{d}{g}$$

y el aislamiento kilométrico es

$$R_k = K R$$

Aislamiento de un cable; sus variaciones. — Consideremos un cable, cuyo dieléctrico tenga por diámetros interior y exterior, d y D respectivamente.

La derivación de la corriente tendrá lugar del alma al exterior, atravesando radialmente la envoltura; de manera que podrá calcularse la resistencia de la cubierta, suponiéndola cortada paralelamente al eje del conductor y abierta luego como se indica en la figura 34.

Al abrir la envoltura, se supone bastante elástica para no resquebrajarse, pero da un espesor

$$\text{longitud} = B C = d \times \log \frac{D}{d}$$

y teniendo en cuenta que el cable tiene una lon-

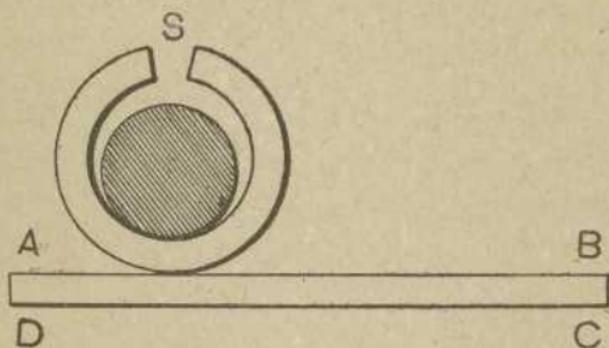


Fig. 34

gitud l , la superficie de la envoltura desarrollada ya, será

$$\text{sección} = A B \times l = \pi d l$$

Con estas dimensiones, aplicando la fórmula general de la resistencia de un conductor (tomo I, página 83), tendremos:

$$R = \rho \frac{d \times \log \frac{D}{d}}{\pi d l} = \rho \frac{\log \frac{D}{d}}{\pi l}$$

Para deducir una consecuencia importante, pongamos la expresión anterior así:

$$\log \frac{D}{d} = \frac{R \pi l}{\rho}$$

Esta fórmula hace ver que para conservar un aislamiento kilométrico invariable, con cables de secciones crecientes, es preciso que los dieléctricos crezcan también proporcionalmente a los diámetros del alma, porque si el aislamiento debe ser constante, será constante el segundo miembro de la ecuación y deberá ser constante la relación D/d . Así por ejemplo, a doble diámetro de cobre d , doble diámetro exterior D , y doble espesor de aislante $D - d$.

La resistividad de los dieléctricos empleados en el aislamiento de cables, varía notablemente con la temperatura, presión, tiempo de electrización y signo de la corriente empleada.

Las variaciones con la temperatura, referidas a la de cero grados, obedecen a la fórmula empírica

$$\rho_t = \rho_0 a^t$$

siendo a un coeficiente propio de cada aislador. En el caso de la gutapercha, que es el más empleado, $a = 0.9$.

La presión aumenta la resistividad, y a una presión p (kilogramos por cm^2) se relaciona con la resistividad a la presión atmosférica, mediante la fórmula empírica

$$\rho_p = \rho_0 (1 + bp)$$

siendo b para la gutapercha 0.003.

El tiempo de electrización aumenta también la resistividad. Generalmente las mediciones se efectúan después de un minuto de electrización.

Cuando los cables están sumergidos en agua, o, al menos, rodeados de humedad, y su envoltura está rota en algún punto, se halla mejor aislamiento cuando se emite corriente positiva que cuando se emite negativa. Esto es debido a que la corriente positiva, descomponiendo el agua, oxida la superficie de cobre; mientras la negativa reduce los óxidos que pudieran protegerla y la descubre.

Pérdidas admitidas. — En las líneas aéreas para comunicaciones telegráficas y telefónicas, puede aceptarse como buen aislamiento un megohmio por kilómetro, en el estado higrométrico normal de la atmósfera. En tiempo muy seco, podrá el aislamiento subir a algunos megohmios, y en tiempo húmedo bajará a décimas de megohmio solamente.

En las líneas para corrientes de tensión elevada, hay que exigir mejor aislamiento, pudiendo admitirse el megohmio por kilómetro, como mínimo, en tiempo muy húmedo, pero llegando de 40 a 50 megohmios en tiempo seco.

En las líneas formadas por cables recubiertos, el aislamiento es más perfecto y constante.

Generalmente se fija en relación con el voltaje a que debe funcionar, exigiéndose por término medio un aislamiento kilométrico de 25 megohmios por cada 100 voltios.

Para canalizaciones interiores, las compañías explotadoras suelen fijar el aislamiento mediante fórmulas empíricas, que dependen del potencial V de distribución, de la intensidad I , o del número de lámparas N del tipo corriente.

He aquí tres fórmulas empleadas por las compañías que se indican:

$$\text{Villa de París..... } R = \frac{5 V^2}{10^6} \text{ megohmios}$$

$$\text{Institución de Ingenieros electricistas de Londres. } R = \frac{5000 V}{I} \quad \text{»}$$

$$\text{Compañía catalana, de Barcelona..... } R = \frac{10}{N} \quad \text{»}$$

En general el aislamiento de las instalaciones interiores de baja tensión es suficiente cuando la pérdida a tierra no pasa de un miliamperio en cada derivación.

Derivaciones en líneas telegráficas o telefónicas.

Además de la pérdida a tierra que supone el mal aislamiento de que tratamos en los párrafos anteriores, una línea puede tener una comunicación accidental con tierra, bien por la rotura de un aislador, bien por el contacto de un objeto conductor, o por otra causa cualquiera, constituyendo una derivación.

En los circuitos telegráficos y telefónicos, la derivación debilita o anula la corriente de transmisión, oponiéndose al buen funcionamiento.

En las líneas de tensión industrial, la derivación consume siempre energía, y si su resistencia es poca, ocasiona una caída de potencial en toda la red o aumenta el amperaje hasta comprometer los fusibles o automáticos.

Vamos a estudiar un hilo telegráfico o telefónico $A B$ (fig. 35), que tiene en su extremo A una pila y en el B un receptor. En un punto intermedio C , que divide la resistencia total de la línea, en dos

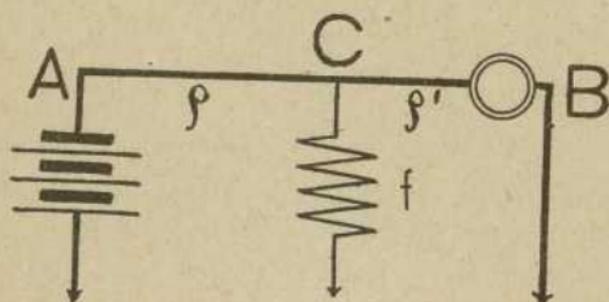


Fig. 35

partes ρ y ρ' , se presenta una derivación a tierra, de resistencia f , y se puede calcular la intensidad de corriente que llega al receptor B procedente de un generador de fuerza electromotriz E , mediante la fórmula

$$i = \frac{E f}{\rho \rho' + L f}$$

Variando la posición de la derivación, variará su efecto sobre la intensidad. La situación más perjudicial será aquella en que i alcance su mínimo valor, para lo cual ha de ser un máximo el denominador, y, para ello, basta que ρ y ρ' sean iguales, ya que cuando la suma de dos números es constante

$$\rho + \rho' = L$$

el producto de los mismos es máximo cuando son iguales ambos.

De aquí resulta que *la influencia de la derivación sobre la intensidad, depende de su distancia al centro de la línea, pero no de su proximidad al receptor o al generador de corriente.*

Entiéndase bien, que por *centro de la línea* queremos indicar *el punto que la divide en dos segmentos de igual resistencia, independientemente de sus longitudes.*

En el caso particular de la telegrafía o telefonía, los receptores son siempre más resistentes que los generadores, por lo cual el centro de la línea estará más próximo de la estación receptora que de la trasmisora.

De aquí resulta, que una derivación cercana a la estación receptora, está más próxima al centro resistente de la línea que si estuviese en las inmediaciones de la estación trasmisora, lo cual autoriza para la siguiente deducción: *Cuando de dos estaciones en correspondencia, una recibe bien y otra mal, puede asegurarse que existe una derivación en la línea, más próxima de la que recibe mal que de la que recibe bien.*

Aislamiento de una línea de dos conductores. —

En el sistema de dos conductores, hay que considerar las resistencias de aislamiento r , r' , de cada uno de ellos respecto a la tierra, y la resistencia de aislamiento r'' , de ambos hilos entre sí (fig. 36). Si aplicamos el procedimiento de substitución al conductor A , dando tierra directa al B , hallaremos la resistencia

$$\frac{I}{R} = \frac{I}{r} + \frac{I}{r''}$$

Si damos tierra al *A* y operamos con el *B*, hallaremos

$$\frac{I}{R'} = \frac{I}{r'} + \frac{I}{r''}$$

y si mantenemos los dos aislados (fig. 36)

$$\frac{I}{R''} = \frac{I}{r''} + \frac{I}{r + r'}$$

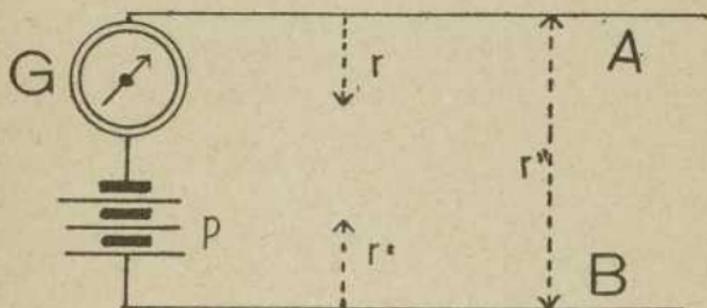


Fig. 36

El sistema de las tres ecuaciones permite determinar las tres incógnitas r , r' , r'' , en función de los datos R , R' , R'' , determinados por la experiencia.

Determinar un contacto con tierra. — La determinación de un contacto con tierra presenta dos casos muy diferentes, según que podamos disponer de los dos extremos del conductor averiado, o que esté a nuestro alcance sólo uno de los extremos.

En el caso de estar a nuestro alcance los dos extremos del conductor derivado, podremos determinar el punto de la avería, mediante un puente de Wheatstone equilibrado (tomo I, pág. III).

Se dispone el conductor 3.2, derivado en el punto desconocido 4 (fig. 37), conexasión con una pila p , un galvanómetro G y dos resistencias a y b , como se indica en el esquema que corresponde con

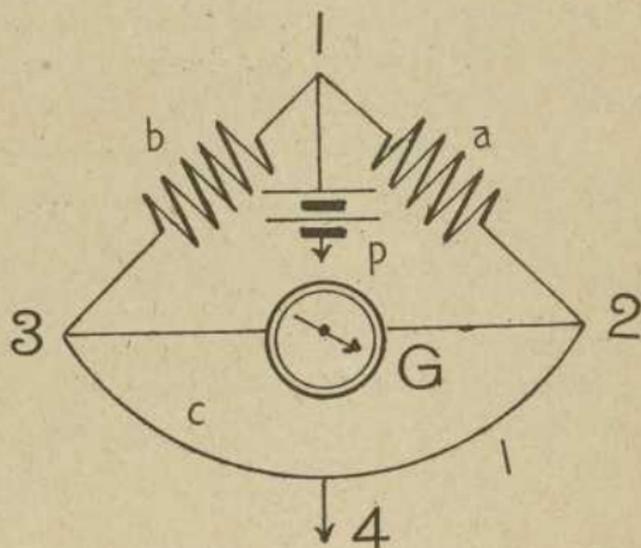


Fig. 37

la figura 29 del tomo I. Disponiendo de las resistencias a y b se hacen variar hasta que la inmovilidad del galvanómetro nos indique que el puente está equilibrado. En este momento se cumple la condición.

$$\frac{a}{b} = \frac{l}{c}$$

Si además conocemos la resistencia total del conductor, medida en tiempo normal

$$c + l = h$$

tendremos un sistema de dos ecuaciones para determinar las dos incógnitas c y l que precisan el punto de la derivación.

Para resolver fácilmente el sistema, se toma la ecuación

$$\frac{a}{b} = \frac{l}{c}$$

y agregando una unidad a cada uno de los miembros de la ecuación, se tiene

$$1 + \frac{a}{b} = 1 + \frac{l}{c} \quad \text{o} \quad \frac{b+a}{b} = \frac{c+l}{c}$$

Teniendo en cuenta que $c + l = h$ puede escribirse

$$\frac{b+a}{b} = \frac{h}{c}$$

de donde

$$c = \frac{bh}{b+a}$$

y, por lo tanto,

$$l = h - c = h - \frac{bh}{b+a} = \frac{bh + ah - bh}{b+a}$$

o, finalmente,

$$l = \frac{ah}{b+a}$$

Importancia de la derivación. — En algunos casos, es también interesante conocer la resistencia de la derivación, a la vez que su exacta situación sobre el conductor.

Consideremos una línea AB (fig. 38) y tratemos de medir y localizar una derivación existente en el punto C .

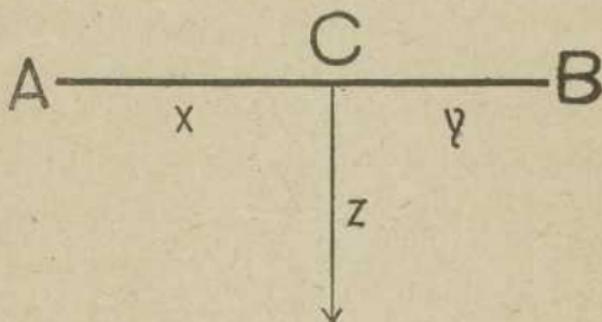


Fig. 38

Sean x , y , z , las resistencias de los dos trozos de línea y de la derivación. Para determinar estas resistencias, que serán proporcionales sensiblemente a las longitudes, haremos pruebas de resistencias desde el extremo A , teniendo el extremo B aislado, y nos dará una resistencia a .

$$a = x + z$$

Las repetiremos desde B , teniendo aislado el conductor en A y obtendremos un resultado b , cumpliendo la condición

$$b = y + z,$$

y tomando datos de las pruebas periódicas que se realizan en todas las redes, tendremos

$$c = x + y$$

De estas tres ecuaciones se deduce

$$x = \frac{a + c - b}{2} \qquad y = \frac{b + c - a}{2}$$

$$z = \frac{a + b - c}{2}$$

fórmulas que nos precisan la situación de la derivación x : y , y su importancia z .

Caso de alcanzarse un solo extremo del conductor. — Caso de no poderse disponer más que de un extremo del conductor, puede determinarse la situación y la importancia de la derivación, por un método análogo al anterior, pero procediendo del modo siguiente:

Nos referiremos a la misma figura 38.

Desde el extremo A , único accesible, se hacen pruebas de resistencia, teniendo el extremo B aislado, y obtendremos un resultado a , que valdrá

$$a = x + z.$$

Se repiten las pruebas, poniendo B en tierra, y obtendremos

$$b = x + \frac{yz}{y + z}$$

y tomando datos de las pruebas periódicas realizadas en el conductor

$$c = x + y$$

De las ecuaciones primera y tercera de este sistema, se deduce:

$$z = a - x \quad y = c - x$$

y llevando estos valores a la segunda ecuación, se obtiene

$$x = b - \sqrt{(b - c)(a - b)}$$

Conociendo x en función de los resultados a , b , c de los experimentos, será luego fácil calcular y , z mediante las fórmulas penúltimas.

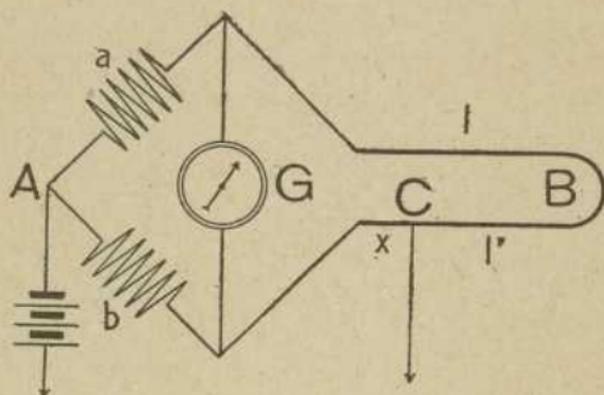


Fig. 39

Método de Murray. — Este método está indicado cuando sólo puede alcanzarse un extremo del hilo derivado, pero puede disponerse de un hilo en buen estado, paralelo al hilo averiado.

Se monta el puente como indica la figura 39, con dos brazos a y b variables. El tercer brazo se constituye con la parte x del hilo averiado, situada más acá de la derivación, y el cuarto, con el hilo l útil y la parte del averiado, situada más allá de

la derivación, empalmados ambos en la estación correspondiente *B*.

Tendremos, cuando el puente esté equilibrado,

$$\frac{a}{b} = \frac{l + l' - x}{x}$$

Sumando una unidad a cada miembro de la igualdad

$$1 + \frac{a}{b} = 1 + \frac{l + l' - x}{x}$$

y efectuando las operaciones

$$\frac{b + a}{b} = \frac{x + l + l' - x}{x} = \frac{l + l'}{x}$$

de donde

$$x = \frac{b(l + l')}{b + a}$$

Si se conocen las resistencias normales de las dos líneas, queda resuelto el problema.

Método del galvanómetro diferencial. — Como en el método anterior, se empalman en la estación *B*, el hilo útil y el averiado, y se monta un galvanómetro diferencial, como indica la figura 40, siendo *R* un reóstato variable.

Tanteando el valor de *R*, conseguiremos equilibrar los dos circuitos, y cuando esto se verifique, tendremos

$$R + x = l + l' - x$$

de donde

$$x = \frac{l + l' - R}{2}$$

Indicadores de tierra. — En las líneas de transmisión y redes de distribución, es interesante vigilar el estado de aislamiento de los conductores res-

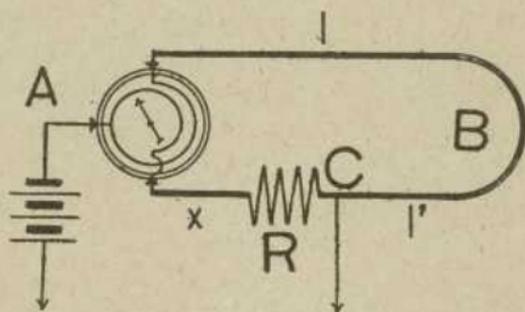


Fig. 40

pecto a tierra. Las derivaciones accidentales o permanentes en las líneas son siempre causa de pérdidas de carga y aun de accidentes desagradables o peligrosos.

Para indicar, y aun avisar con alarma, la presencia de una tierra, se emplean los *indicadores de tierra*, y cuando las redes eléctricas se mantienen constantemente en carga, pueden adoptarse las disposiciones siguientes para notar inmediatamente un defecto grave de aislamiento.

Línea de dos hilos. — Si la línea es de dos conductores solamente, continua o monofásica, como

la de la figura 41, *I*, se derivan entre los conductores *A*, *B*, dos lámparas *a* y *b* en serie, que exijan cada una para su funcionamiento todo el voltaje existente entre los hilos de la canalización. Es claro que en estas condiciones las dos lámparas lucen mal,

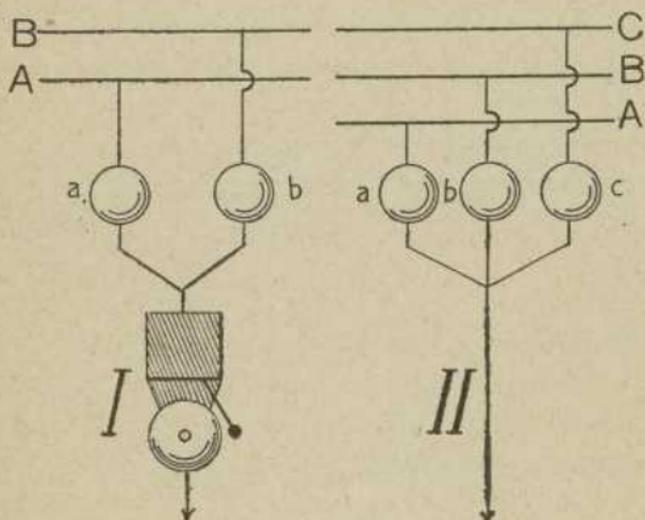


Fig. 41

y su filamento se mantiene rojo solamente. Entre las dos lámparas se deriva un hilo que, después de atravesar un timbre de alarma, comunica con tierra.

Supongamos que el hilo *A* tiene un contacto accidental con tierra. En este momento, la lámpara *a* cierra su circuito a través de la tierra y con independencia de la *b*. Aprovechando, por lo tanto, todo el voltaje de distribución, adquiere mayor brillo su luz. Por fin, verificándose la toma de tierra a través del timbre, éste funciona, llamando la atención del encargado de la vigilancia.

Si fuese el hilo *B* el que comunicase con tierra, sucedería todo igual, pero sería la lámpara *b* la que se iluminaría.

A veces se instala el indicador de tierra con una sola lámpara, unida por un lado invariablemente, a tierra, y por el otro a un conmutador de dos direcciones, que permite conexasarla con uno u otro de los conductores. Es claro que este procedimiento no es avisador.

Si ocurriese en la línea un accidente que pusiera los dos hilos a la vez en comunicación con tierra, se comprende fácilmente que el avisador no funcionaría.

Línea trifilar. — Para distribuciones trifilares con neutro en tierra, bastará vigilar una lámpara de cada puente. Si uno de los hilos activos toma tierra, se apagará la lámpara correspondiente.

Línea trifásica. — Si la línea es trifásica (figura 41, II), se derivan tres lámparas *a*, *b*, *c*, que tienen su salida a tierra. Estas lámparas deben ser para funcionar a *V* voltios, pero tal como están instaladas, tienen sólo la tensión simple $V : \sqrt{3}$, y sus luces se mantendrán mortecinas. Si un conductor cualquiera, el *A* por ejemplo, tomase tierra en la línea, su bombilla *a* se apagaría por completo, mientras las otras dos sometidas entonces a la tensión total, brillarían con todo su esplendor.

En el esquema de la figura 42 se representa un sistema avisador, para corrientes trifásicas. Se substituyen las bombillas por *relais de mínima* *a*, *b*, *c*,

que con la tensión simple $V : \sqrt{3}$, tomen suficiente corriente para mantener adherida su palanca.

Si un conductor cualquiera, el C por ejemplo, toma tierra, su relai *c* se queda sin tensión y la

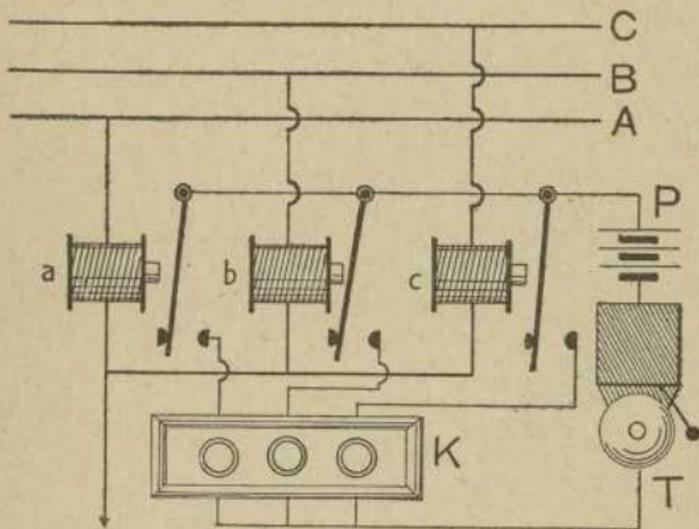


Fig. 42

palanca, al desprenderse, cierra el circuito de la pila *P* a través del timbre *T* y del cuadro indicador *K*. Con esto se avisa y se indica el conductor averiado.

Líneas de alta tensión. — Si se trata de corrientes alternas de alta tensión, pueden utilizarse los mismos sistemas estudiados en la figura 41 II, pero substituyendo las lámparas o *relais* por primarios, de transformadores que tengan su salida a tierra, y cerrando los secundarios a través de las lámparas (fig. 41) o a través de los relais (fig. 42).

Estos transformadores que normalmente funcionan a $V : \sqrt{3}$ voltios, funcionan en caso de avería, a la tensión total V , por lo cual será prudente mantener sus devanados sumergidos en aceite.

Cruce de conductores. — Consideremos los conductores $A B$ y $C D$ (fig. 43) cruzados en el punto M , y tratemos de determinar la distancia x , a que

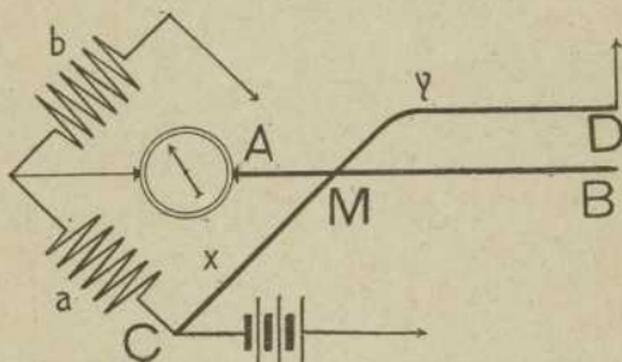


Fig. 43

se encuentra el cruce de la estación en que se opera, o, mejor dicho, la relación de distancias $x : y$, desde el cruce hasta los extremos del conductor $C D$.

Se monta un puente de Wheatstone, como indica la figura, dando tierra al conductor $C D$ en su extremo D y aislando el extremo B del otro conductor.

La diagonal del puente donde está el galvanómetro, se forma con la parte del hilo aislado, comprendida entre la estación A y el cruce M .

Cuando el puente está equilibrado, se tendrá la proporción

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

que resuelve el problema.

Si la resistencia del conductor $C D$ fuese conocida de antemano, tendríamos también la ecuación

$$x + y = l$$

y de las dos podríamos deducir

$$x = \frac{al}{a + b}$$

Cuando existe un tercer hilo, paralelo a los cruzados puede emplearse otro procedimiento.

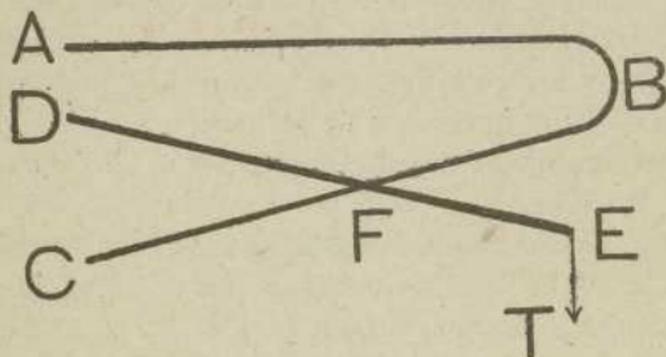


Fig. 44

En la estación corresponsal, se empalma uno de los hilos cruzados $C B$, con el hilo en buen estado $A B$ (fig. 44) y el otro hilo se pone a tierra. Entonces el segmento $F E T$ constituye una derivación para el conductor $A B F C$ y puede determinarse la situación del punto F por cualquiera de los procedimientos indicados anteriormente.

Rigidez dieléctrica. — Las líneas eléctricas, además de la pérdida por *descargas conductivas* debidas

a la poca resistencia de los aislantes, pueden tener pérdidas por *descargas disruptivas* (tomo I, pág. 60) debidas a la poca capacidad inductiva de sus dieléctricos (tomo I, pág. 67). Este fenómeno tiene mayor importancia en las líneas aéreas que en los cables armados, toda vez que en éstos su rigidez dieléctrica no altera con las variaciones atmosféricas.

Toda línea aérea de alta tensión, después de construída, debe ser probada en su rigidez dieléctrica, entre los distintos conductores y la tierra. Para ello se someten todos los hilos de la línea, aislados y desconectados de los pararrayos y limitadores, durante quince minutos a una tensión igual a una vez y media la tensión de servicio, y se da después la misma diferencia de tensión entre cada conductor y tierra.

Los cables acorazados, para líneas subterráneas, se prueban, después de 24 horas de inmersión en el agua, a las siguientes tensiones:

<u>Tensión de servicio</u>	<u>Tensión de prueba</u>
Hasta 1000 voltios	3 veces
De 1000 a 5000 voltios	1000 + 2 »
De más de 5000 »	3500 + 1'5 »

ÍNDICE

Página

CAPÍTULO I. — *Líneas eléctricas aéreas.*

Generalidades	5
Circuitos eléctricos	6
Clasificación de las canalizaciones	7
Conductores de cobre	8
Conductores de aluminio	10
Conductores de hierro	11
Condiciones generales de los postes	14
Postes de madera	16
Postes de hierro	18
Postes de cemento armado	19
Torres de celosías	22
Soportes	24
Aisladores	29
Formas de aisladores	30
Aisladores blindados y coloreados	34
Ensayo de aisladores	36
Ensayos industriales	36
Proyecto de una línea eléctrica	42
Trazado y determinación de una línea eléctrica	44
Plano parcelario	45
Dibujo del plano topográfico. Escalas	46
Escala gráfica	47

	<u>Página</u>
CAPÍTULO II. — <i>Líneas para corriente continua.</i>	
Cálculo de conductores	48
Densidad de corriente	50
Ejemplos numéricos.....	54
Calentamiento de conductores	55
Ejemplos	57
Cálculo de conductores por efecto Joule ..	58
Ejemplos	58
Caída de potencial	59
Ejemplos	60
Ventaja de las altas tensiones	61
Regla de Thomson.....	62
Valores de los coeficientes	64
Ejemplo	65
CAPÍTULO III. — <i>Líneas para corriente alterna.</i>	
Cálculo de conductores	66
Ejemplo	67
Elección de frecuencias y tensiones.....	67
Resistencia kilométrica y total de un conductor	69
Autoinducción e inducciones mutuas kilométricas	70
Ejemplos	70
Inducciones y desfases aparentes.....	71
Corriente monofásica	71
Corrientes trifásicas	72
Ejemplos	72
Línea trifásica doble	74
Líneas simétricas	75
Ejemplos numéricos.....	76
Relación entre los elementos de la línea y de la corriente	76

	<u>Página</u>
Método de Blondel	78
Problemas numéricos	79
Elección del número de fases	88
Sistema monofásico trifilar	89
Sistema difásico con cuatro conductores ..	89
Sistema difásico con tres conductores.....	89
Sistemas trifásicos	90
 CAPÍTULO IV. — <i>Cálculo mecánico de las líneas aéreas.</i>	
Curva del conductor.....	91
Definiciones.....	92
Coordenadas de los apoyos	93
Relación entre las coordenadas de un punto.	93
Valor de la flecha	93
Problemas numéricos geométricos	94
Tensión en el apoyo más bajo	95
Tensión superficial	95
Tensión en un punto cualquiera	96
Vano máximo	97
Coefficiente de seguridad en distintos puntos del conductor	97
Componentes de la tensión	98
Longitud del conductor por vano	100
Sobrecargas mecánicas	101
Variación de la longitud con la sobrecarga y la tensión	102
Variación de la tensión con la temperatura.	103
Variación del coeficiente de seguridad	104
Efecto de la elasticidad	104
Ecuación general de las tensiones.....	105
Caso de soportes con desnivel	106
Fórmulas prácticas.....	107
Ejemplos	107

CAPÍTULO V. — *Canalizaciones subterráneas.*

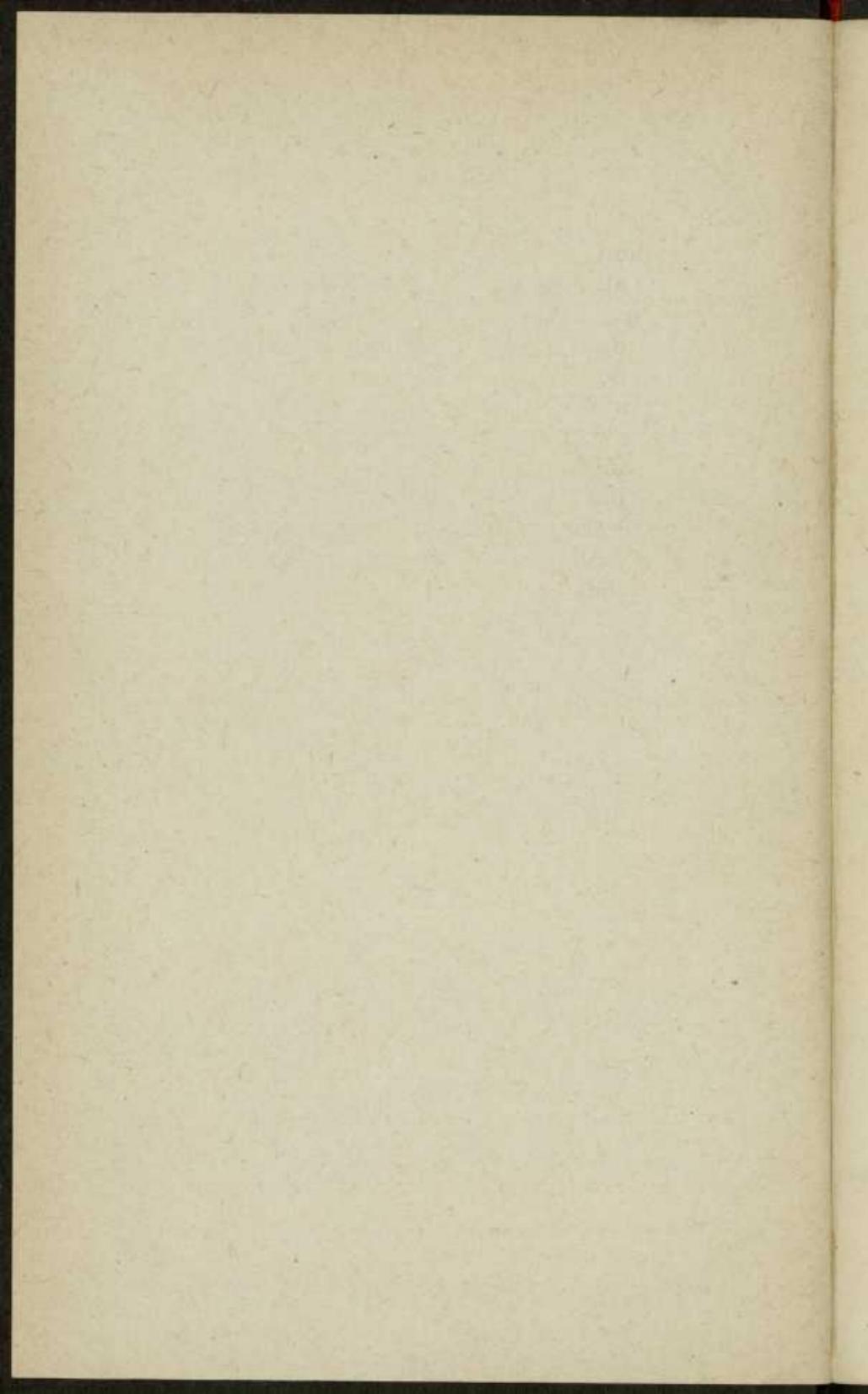
Generalidades	114
Tubos y canales	117
Cables	118
Tendido de cables	119
Empalmes	120
Cables armados.....	121
Cajas de empalme.....	124
Canalizaciones subterráneas con conductores desnudos	125

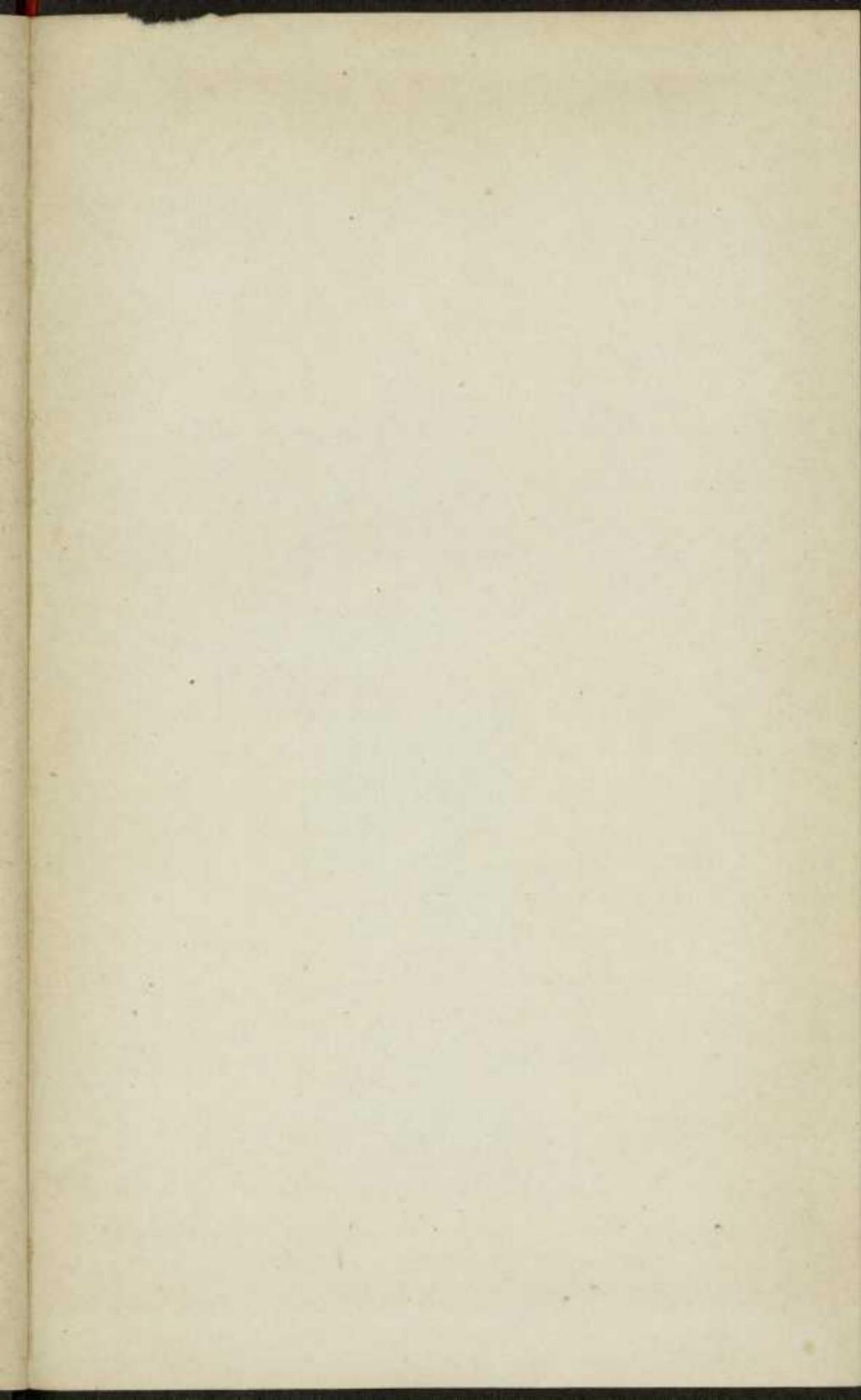
CAPÍTULO VI. — *Pruebas de las líneas.*

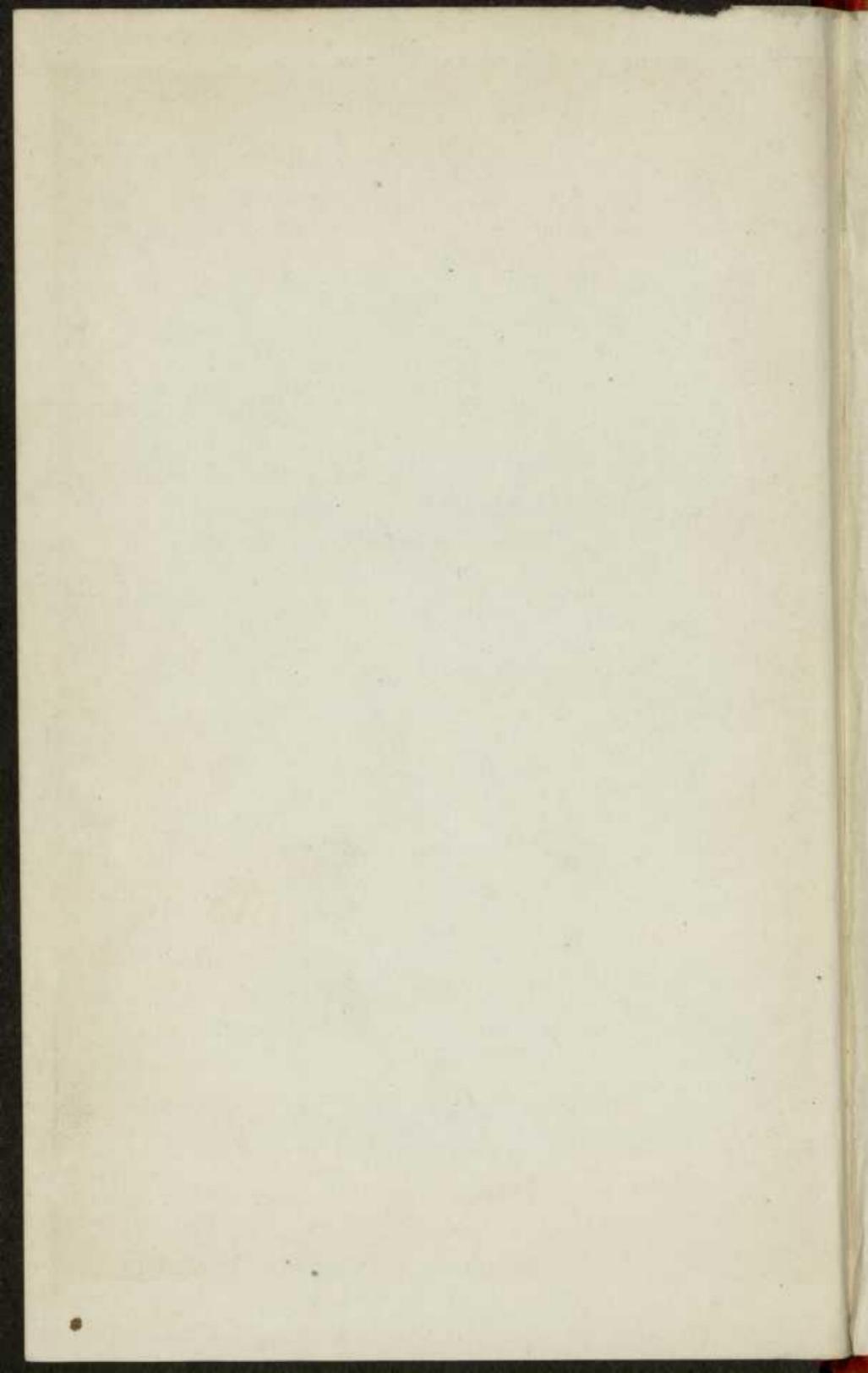
Objeto de las pruebas.....	128
Resistencia de una línea. Método de sustitución	128
Método de galvanómetro diferencial	129
Resistencia de una línea de telecomunicación.	130
Línea con dos o más conductores.....	130
Medida de la autoinducción de una línea..	132
Método de los voltímetros	133
Método del galvanómetro diferencial	133
Medida del coeficiente de inducción mutua.	135
Medida de la capacidad	136
Aplicación a una línea.....	138
Método de Faraday	138
Aislamiento de una línea	139
Medida del aislamiento de un conductor..	141
Aislamiento de un cable: sus variaciones..	142
Pérdidas admitidas	145
Derivaciones en líneas telegráficas o telefónicas.....	146
Aislamiento de una línea de dos conductores.	148
Determinar un contacto con tierra	149

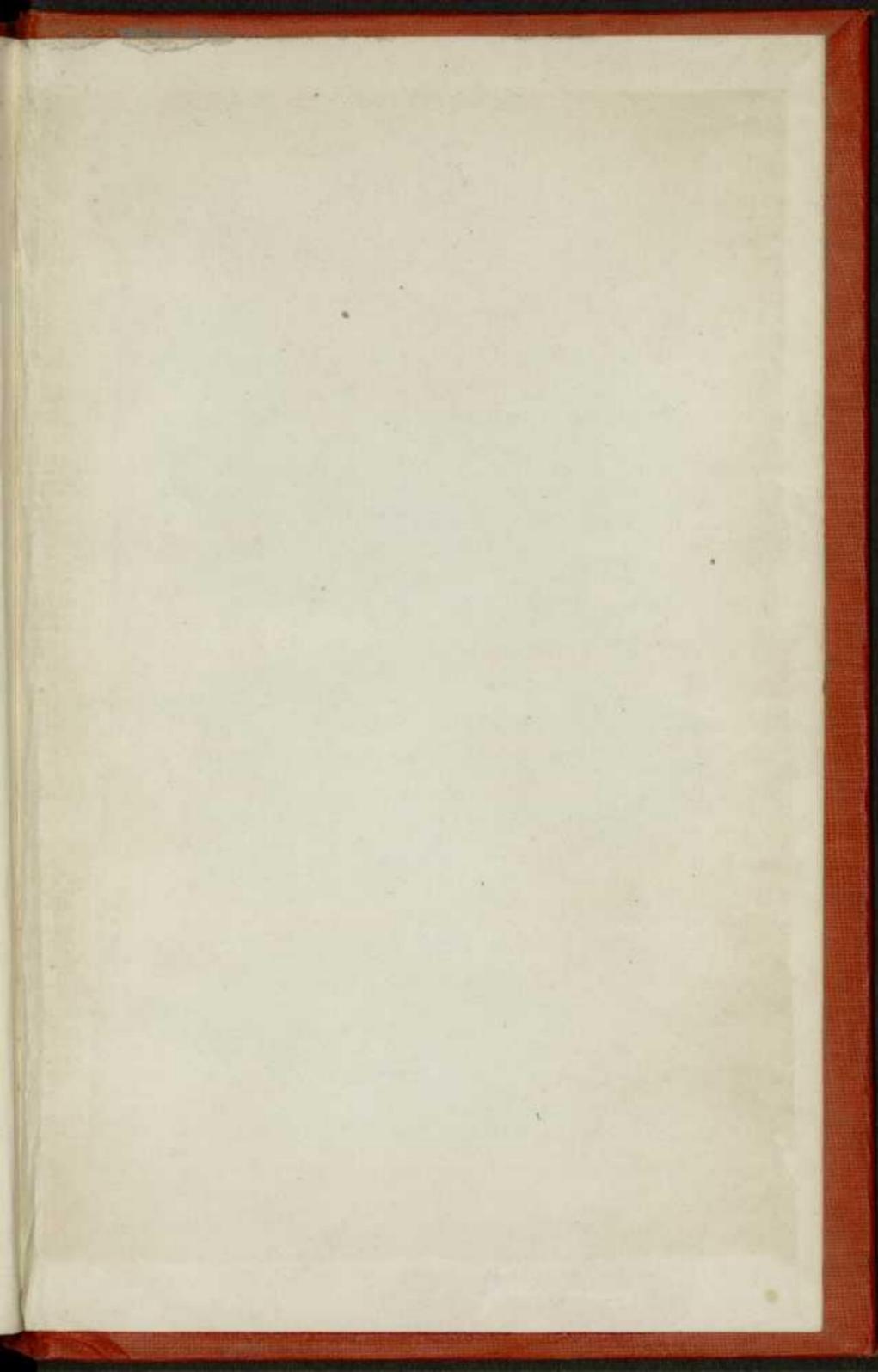
	<u>Página</u>
Importancia de la derivación	152
Caso de alcanzarse un solo extremo del conductor	153
Método de Murray	154
Método del galvanómetro diferencial	155
Indicadores de tierra	156
Línea de dos hilos	156
Línea trifilar	158
Línea trifásica	158
Línea de alta tensión	159
Cruce de conductores	160
Rigidez dieléctrica.....	161

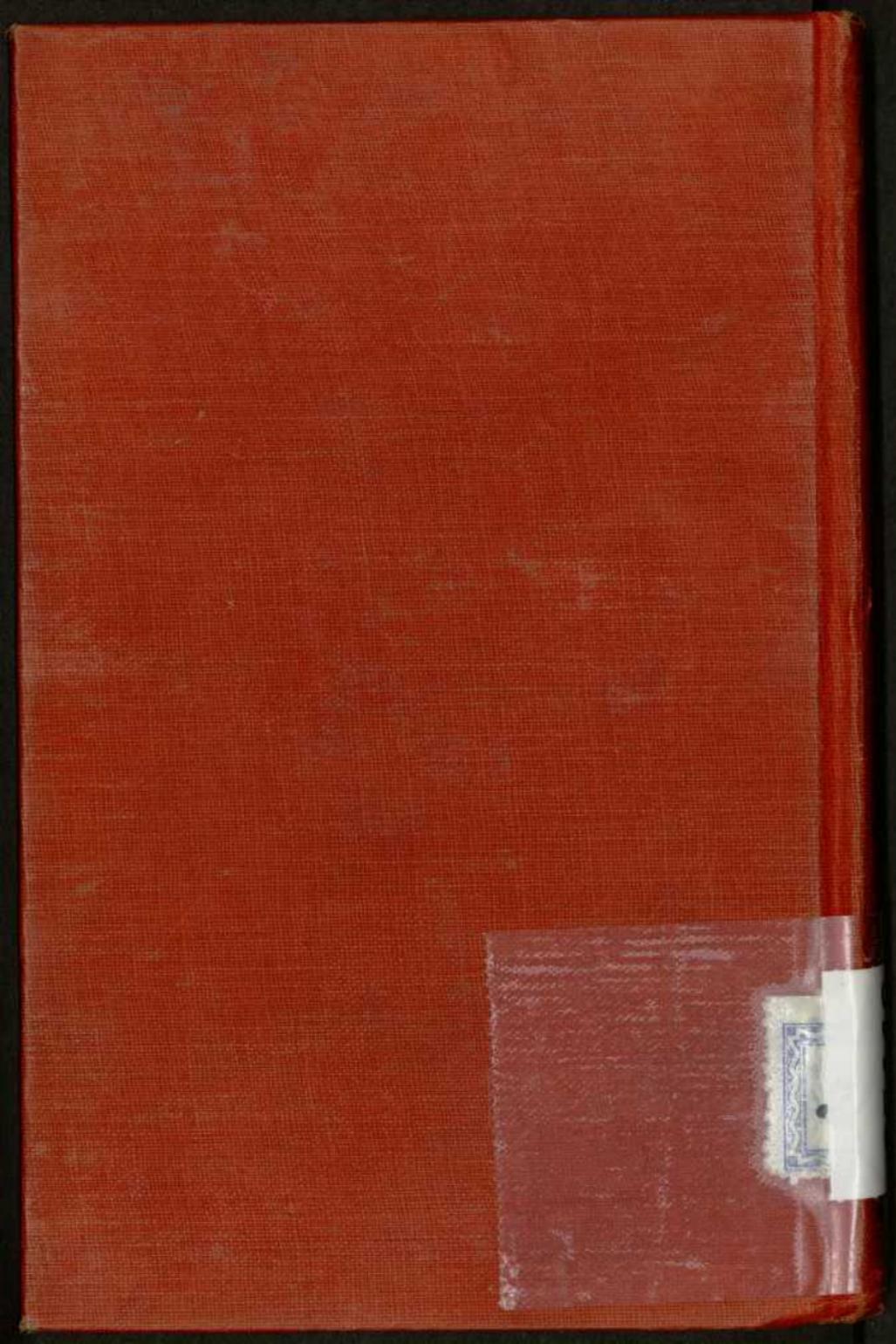












25440

25440