

REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS

PUBLICACIÓN TÉCNICA DEL CUERPO DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

DIRECTOR

D. MANUEL MALUQUER Y SALVADOR

COLABORADORES

LOS INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

SE PUBLICA LOS JUEVES

Dirección y Administración: Plaza de Oriente, 8, primero derecha.

TRANSPORTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA

CON CORRIENTE CONTINUA Y DISTRIBUCION EN SERIE (1)

Desde hace mucho tiempo se emplea el sistema de distribución en serie para el alumbrado por medio de arcos alimentados con corriente continua de intensidad constante, pero rara vez se ha aplicado al transporte de energía; únicamente en Suiza existen algunas instalaciones de poca importancia que lleven algún tiempo funcionando por lo demás, casi todos los transportes de energía eléctrica en explotación emplean corrientes alternas con distribución en paralelo.

La facilidad con que se varía el voltaje de una corriente alterna, la sencillez de los aparatos para realizar tal variación, la solidez con que se construyen los generadores y las ventajas inherentes a la distribución en paralelo, son las razones principales del gran desarrollo que ha adquirido este sistema de transporte y distribución de energía. Sin embargo, cuando la longitud de la línea es muy grande, la impedancia y la capacidad de los conductores son origen de grandes dificultades, las cuales han podido vencerse gracias al estudio profundo que de aquellos elementos se ha hecho por hombres de clara inteligencia. Con las corrientes continuas no se presentan dichas dificultades, razón por la cual ha de ser de mucha utilidad hacer un examen detenido del estado actual del problema relativo al transporte de energía con estas corrientes, tanto con objeto de apreciar las ventajas del sistema y el desarrollo que puede adquirir como para compararle con el de transporte con corriente alterna.

Ya hace tiempo que llamaban mi atención las ventajas que ofrecen las corrientes continuas para los transportes de energía a gran distancia; desde hace dos años me he visto obligado a estudiar esta cuestión con detalle, porque la Compañía a cuyo servicio estoy como Ingeniero ha obtenido varias concesiones de suministro de energía, que comprenden un área de 776 kilómetros cuadrados, limitada por una línea cerrada parecida a una circunferencia, cuya longitud es aproximadamente 129 kilómetros.

El transporte y la distribución se han de hacer con conductores enterrados a partir de la central situada en la circunferencia, de manera que el coste de la red ha de ser de tal importancia, que constituirá el principal factor de toda la instalación, por cuya razón no tuve otro remedio que estudiar con detalle todo sistema que ofreciera alguna ventaja en relación con aquel

particular. Por lo tanto, examiné la posibilidad de aplicar las corrientes continuas a la instalación que se me había encomendado, considerando la cuestión con cierto carácter de generalidad con objeto de que las consecuencias que yo pudiera deducir fueran aplicables a otros casos. El resultado de mis estudios é investigaciones constituye la presente Memoria.

Antes de continuar creo un deber dedicar un recuerdo á Mr. Thury, quien durante muchos años ha trabajado sin descanso sobre todos los detalles relativos al sistema de distribución en serie con corriente continua, y el cual, desde 1839 en que hizo su primera instalación, ha proyectado y construido otras varias de capacidad creciente, siendo la última la de *Mon-tier-Lyon*, inaugurada el año pasado. Continuamente ha ido aumentando el voltaje y simplificando los aparatos, los cuales, tanto por sus detalles como por su disposición general, compiten favorablemente con los correspondientes á las corrientes alternas, que han sido objeto de estudio por parte de muchos electricistas y durante muchos años.

Consideraciones relativas al voltaje.—Al comparar los sistemas de transporte de energía con corriente alterna y con continua, lo primero que hay que examinar es cuál de las dos permite el empleo de voltajes más elevados. Con corrientes alternas, los transformadores estáticos facilitan la creación de grandes voltajes; con continuas se obtiene este resultado acoplando varios generadores en serie, en esta forma se pueden producir corrientes continuas con voltajes elevados sin grandes dificultades.

Hasta muy recientemente era muy poco conocido el efecto de las corrientes continuas de altos voltajes sobre las sustancias aisladoras, siendo por lo tanto de mucho interés su estudio, ya que por lo que se refiere á las corrientes alternas se poseen numerosos datos sobre aquel efecto. Para realizar dicho estudio Mr. Thury construyó cinco dinamos, tres de los cuales producían corriente á 20.000 voltios y dos á 25.000; tanto unos como otros tenían fijos los colectores é inducidos girando las escobillas y los inductores, y á pesar de que la diferencia de potencial entre los sectores del colector era 500 voltios, las máquinas funcionaron perfectamente la intensidad de la corriente era un amperio. La corriente alterna: cuyos efectos se habían de comparar con los de la continua, la producía un alternador de 75 kilovatios y 50 periodos, cuya f. e. m. variaba según la curva representada por la figura 1.^a, algo achatada con relación á las correspondientes á la mayoría de los alternadores, circunstancia que, en unión con el pequeño número de sectores de los colectores de los dinamos empleados, era favorable para los resultados relativos á la corriente alterna.

No es necesario exponer con todo detalle los resultados de los experimentos realizados; es suficiente hacer un resumen de

(1) Memoria leída por Mr. J. S. Highfield en la Institución de Ingenieros electricistas de Inglaterra el 7 de Marzo de 1907.

ellos. Los materiales sometidos á ensayo fueron varios modelos de soportes de porcelana y placas ó bloques de los más comunemente empleados como aisladores.

El primer hecho que debe consignarse es, que así como los dieléctricos se calientan cuando se someten á la acción de una F. E. M. alterna, su temperatura no varía cuando ésta es con-

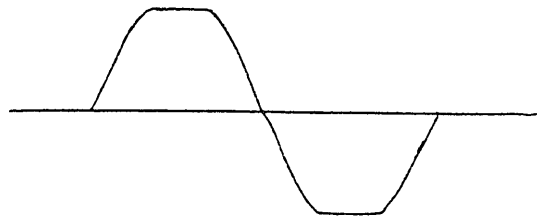


Fig. 1.ª

tinua. Además, en este caso tampoco se produce chispeo alguno poco antes de la rotura; los aisladores ordinarios de telégrafos no se rompen sometidos á diferencias de potencial continuas de 60.000 voltios, siempre que estén bien vitrificados y sean de buena calidad.

Se hicieron ensayos con hojas de cartón (presspahn) de 5 milímetros de espesor, cuyos resultados, aplicables á otros materiales análogos, se consignan en los cuadros siguientes:

1.—Hoja de cartón de 5 milímetros de espesor.—Corriente alterna.

ENSAYO	Tiempo durante el cual actúa la F. E. M.	F. E. M. Eficaz.	Observaciones.
1.	1' 30"	9.000 voltios.	Perforada.
	30"	11.000	
2.	2'	9.000	Descarga fuerte. Perforada.
	15" más.	9.000	

2.—Hoja de cartón de 5 milímetros de espesor.—Corriente continua.

ENSAYO	Tiempo durante el cual actúa la F. E. M.	F. E. M.	Observaciones.
1.	2'	10.000 voltios.	Perforada.
2.	2'	15.000	
3.	2'	18.000	
4.	2'	20.000	
5.	4'	25.000	

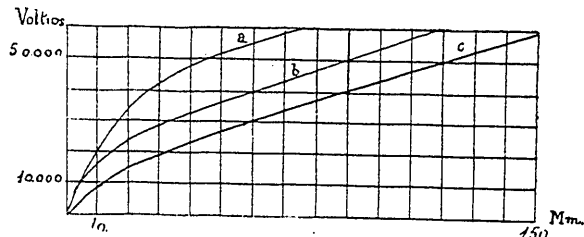
3.—Se ensayaron también placas de mármol de 20 milímetros de espesor que fueron perforadas á los 75" con una F. E. M. alterna de 20.000 voltios y á los 2' con 15.000 voltios. Con F. E. M. continua, el ensayo se hizo en la siguiente forma: se empezó con 10.000 voltios, y cada dos minutos se aumentaba este voltaje en 5.000 voltios, perforándose la placa á los 45.000.

Otros ensayos se hicieron con objeto de determinar las distancias á que salta la chispa, tanto con corriente alterna como con continua, representándose los resultados por curvas en las figuras 2.ª y 3.ª Del examen de éstas se deduce que con el mismo voltaje aquella distancia es con F. E. M. alterna, doble de la que sería con continua. Como resultado de muchos experimentos, puede establecerse como regla general que con los mismos cables y los mismos aisladores, si la corriente es continua, el voltaje puede ser doble que si es alterna.

Los postes empleados en la instalación de Lausana que trans-

porta 4.540 caballos á 56 kilómetros, son análogos á los de telégrafos, sin que por esta circunstancia la línea infunda respeto, todo lo contrario, lo cual hace pensar si serán excesivos los gastos hechos para apoyar otras líneas. Los aisladores son muy pequeños, á pesar de lo cual, la pérdida de energía en la línea es admisible; con un voltaje de 20.000 voltios entre aquélla y tierra

Fig. 2.ª

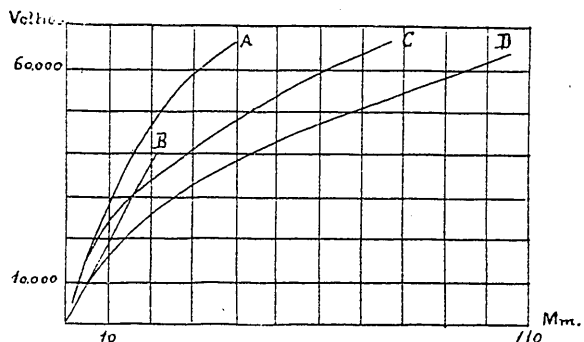


- a.—Esfera con esfera.
- b.—Plano con esfera.
- c.—Plano con punto.

y con ambiente muy húmedo, la pérdida total de energía en 3.000 aisladores y los pararrayos es tan sólo 866 vatios.

Con corriente continua se puede hacer la distribución con tres hilos, uno de los cuales puede susituirse con la tierra, en cuyo caso, el potencial de uno de los conductores es positivo

Fig. 3.ª



- A.—Esfera con esfera.
- B.—Plano (+) con punto (-).
- C.—Esfera (+) con plano (-) y Esfera (-) con plano (+).
- D.—Plano (-) con punto (-).

mientras el del otro será negativo; solución que permite duplicar el voltaje de una instalación con el mismo aislamiento.

Según enseña la experiencia, es posible el funcionamiento de líneas aéreas trifásicas á 60.000 voltios entre conductores, ó sea 40.000 entre uno de éstos y tierra. Con corriente continua podría trabajarse á 80.000 voltios entre hilo y tierra, es decir, á 160.000 voltios entre hilos.

Á excepción de una pequeña sección de una instalación, todas las construidas con arreglo al sistema Thury tienen sus líneas aéreas; pero no hay inconveniente alguno para que puedan colocarse enterradas, en cuyo caso no es necesario encarecer las ventajas que ofrece la corriente continua sobre la alterna.

Sin grandes dificultades se pueden construir cables con un solo núcleo para trabajar á 60.000 voltios con relación á tierra, lo que quiere decir que es posible instalar líneas con dos hilos cuya diferencia de potencial sea 120.000 voltios. Tales cables se construyen con más facilidad que uno de tres núcleos dispuestos para trabajar á 20.000 voltios entre conductores.

Si se compara el sistema Thury con el trifásico, resulta: que dejando á un lado las menores dificultades que presenta el primero, por lo que se refiere al aislamiento, si la línea es aérea, el Thury exige dos conductores, mientras que el trifásico necesita tres, y si es subterránea la del primero puede constituirse

por un solo cable con dos núcleos, ó con dos cables de uno solo, en tanto que la del segundo se ha de hacer con un cable de tres núcleos. Cuando la corriente es continua, no hay que ocuparse para nada de la capacidad y de la autoinducción de los conductores, por cuya razón la longitud de la línea no tiene límites.

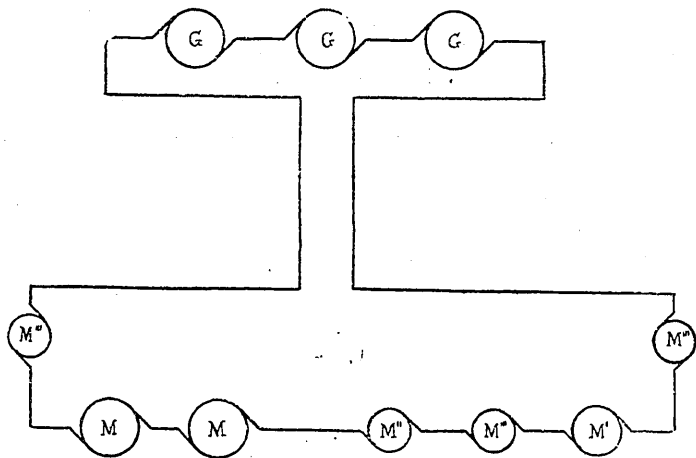
En el Cuadro I se consignan los datos más interesantes relativos á varias instalaciones que llevan algunos años en explotación; en él se observará que el voltaje más alto hasta hoy día empleado es 58.000 voltios con distribución trifilar, ó 29.000 voltios entre cada conductor y tierra. La línea se probó á 100.000 voltios entre hilo y tierra.

Distribución en serie y en derivado.—En todas sus instalaciones Thury conserva constante la corriente, lo cual simplifica notablemente la construcción de los generadores, de los motores y de los aparatos reguladores, con la ventaja además de que las pérdidas de energía en la línea representan muy poco dinero. En muchas instalaciones la línea principal entra en los edificios que ha de servir, en cuyo caso la intensidad de la corriente tendrá que conservar el mismo valor durante las veinticuatro horas del día, porque de lo contrario variaría la potencia de cada motor aunque su velocidad no se modificase. Pero si la distribución se hace con una central y varias subestaciones, entonces no es necesario que la intensidad de la corriente sea la misma durante todo el día, sino que podrá reducirse en un 30 por 100 durante ciertas horas, mejorando así notablemente el rendimiento de la línea. Como los generadores y los motores se enlazan en serie á todo lo largo de la línea, no es preciso que los primeros se sitúen en una sola estación, pueden repartirse entre dos ó más.

Como es mucho más conocido el sistema de distribución en derivado que el en serie será muy conveniente exponer, aunque sea brevemente, las diferencias entre uno y otro, las cuales son de dos clases, unas que se refieren á la disposición general del sistema y otras á su funcionamiento.

Se tratará en primer lugar de las últimas: la figura 4.^a repre-

Fig. 4.^a



- G.—Generadores de 800 kv. á 4.000 voltios.
 - M.—Motores de 800 kv. á 4.000 voltios.
 - M'.—Motor de 300 kv. á 1.500 voltios.
 - M''.—Motor de 200 kv. á 1.000 voltios.
 - M'''.—Motores de 100 kv. á 500 voltios.
- Intensidad de corriente: 200 amperios.

senta el esquema de una distribución en serie constituida por tres generadores y varios motores, y la figura 5.^a el correspondiente á una instalación elemental. Los generadores y motores se enlazan á la línea con conmutadores de cuatro polos, de tal manera que cuando el servicio está interrumpido todas las máquinas se *desenganchan* de la línea, la cual forma entonces un circuito cerrado. Antes de enlazar á la línea un generador cualquiera se le pone en marcha, y cuando produce la corriente normal es el momento oportuno para enviar ésta á la línea, ma-

niobrando el conmutador correspondiente que pone al generador en serie con aquélla.

El enlace de un motor con la línea se hace de la manera siguiente: se mueve su conmutador en forma tal que toda la corriente de la línea pase por aquél, y á las escobillas, que deben

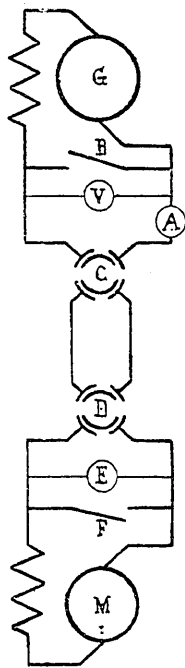


Fig. 5.^a

- G.—Generador.
- B.—Conmutador automático de corto circuito.
- V.—Voltímetro.
- A.—Amperímetro.
- C.—Conmutador.
- D.—Conmutador.
- E.—Voltímetro.
- F.—Conmutador automático de corto circuito.
- M.—Motor.

estar situadas en la posición correspondiente al reposo, se las hace girar en el sentido conveniente para que el motor arranque, cuya velocidad aumenta con el movimiento de las escobillas. Cuando la velocidad es muy grande el regulador automático toma carga, modifica la posición de las escobillas, y por lo tanto mantiene constante la velocidad. Á medida que aumenta la carga se ponen en marcha otros generadores y motores por el mismo procedimiento. Para parar un motor se llevan lentamente las escobillas á la posición de reposo, con lo cual aquél cesa de girar y entonces se le pone un cortacircuito. El mismo procedimiento se sigue con los generadores. Si la carga crece, la resistencia total del circuito y la F. C. E. M. de los motores aumenta rápidamente, lo cual lleva consigo un aumento de voltaje en la central.

El efecto de un cortacircuito es reducir la carga, pero si no se establece rápidamente, el regulador puede disminuir el voltaje en la medida necesaria para que la intensidad de la corriente conserve su valor normal. Para prevenir las funestas consecuencias de un cortacircuito instantáneo los generadores se acoplan á sus motores con embragues de adherencia, cuyas plantillas deslizan uno sobre otro cuando el par es superior en un 20 por 100 al correspondiente á la carga máxima; este deslizamiento da tiempo á los aparatos automáticos para funcionar, evitando así toda avería en la instalación. Una ventaja importante del sistema de distribución en serie consiste en que si por cualquier circunstancia uno de los motores de la central experimenta una avería y se para con su generador, el servicio no sufre alteración alguna porque la corriente seguirá pasando por el generador parado, sin que sea necesario prevenir esta contingencia con aparatos automáticos.

Consideremos ahora las diferencias entre los sistemas de distribución en serie y en derivado desde el punto de vista de su disposición general. Cuando la carga es determinada y constante los dos sistemas son á cual más sencillos.

En caso contrario, hay que tener en cuenta la importancia de la carga, su distancia á la central, el voltaje, la potencia de las unidades y la densidad de corriente en los conductores.

Las consideraciones que sirven de base á la fijación del voltaje son las mismas para ambos sistemas; pero con la distribución en serie con corriente continua sucede que como los aisla-

mientos son mucho más baratos que los correspondientes al otro sistema, suponiendo las mismas condiciones para los dos, generalmente resultará mucho más económico trabajar con voltajes excesivamente altos.

Al fijar la potencia de cada unidad no se tropieza con limitación alguna cuando la distribución se hace en derivado, determinándose el número de aquéllas con suma facilidad, sin olvidarse de contar con algunas para reserva. Con el sistema serie hay que tener presente que los generadores no pueden pasar de cierto voltaje, circunstancia que es muy importante.

Durante varios años han estado prestando servicio dinamos de 2.000 á 3.000 voltios, sin que sea imposible llegar á construirlos hasta 6.000 con un solo colector; esta limitación en el voltaje, así como la intensidad de la corriente que ha de circular por la línea, restringen la potencia de cada unidad. En algunos casos se podrá acoplar dos generadores á un solo motor, duplicando así la potencia de cada grupo.

Ya se ha indicado que es admisible el voltaje de 100.000 voltios; por lo tanto, si la intensidad de la corriente en la línea es 500 amperios, ésta podrá transportar 500.000 kilovatios. Con tal corriente es posible construir dinamos de 5.000 voltios, y acoplando dos á un motor la potencia de cada grupo sería 5.000 kilovatios, es decir, que se necesitarían diez grupos. Para reducir el número de éstos habría que bajar el voltaje y aumentar la intensidad de la corriente en la línea.

Cuando se trata de instalaciones que empiezan en muy pequeña escala y que lentamente se van desarrollando, aunque en una forma imposible de prever, entonces es de mucho interés considerar las diferencias entre los dos sistemas de distribución.

En el sistema derivado, si el área que hay que servir es pequeña, el voltaje se fija en vista de la distancia de transporte. La explotación se empezará con unidades pequeñas, á las que se agregarán otras de potencia creciente á medida que el consumo de energía lo exija. La distancia de transporte no puede aumentarse; la limita el voltaje adoptado.

Si en un sistema serie se empieza la explotación con una carga relativamente pequeña, se necesitará muy poca corriente; ahora bien, como la corriente en la línea es quien prácticamente determina la potencia de los grupos, ésta no podrá modificarse sin cambiar aquélla, y si se aumentase la intensidad de la corriente habría que sustituir todas las máquinas. Por todo lo expuesto, se empieza generalmente con corrientes más intensas que lo necesario, lo cual, á su vez, tiene el inconveniente de que durante los primeros años de explotación las pérdidas de energía en la línea serán muy grandes en relación con la energía consumida.

Esta dificultad puede vencerse con la siguiente solución: se forma cada grupo con dos dinamos, que trabajan en serie al empezar á funcionar la instalación, tanto en la central como en las subestaciones; cuando la carga aumente, se monta una segunda línea, que trabajará en paralelo con la primitiva, y al mismo tiempo los dos dinamos se acoplan en derivado, duplicando la corriente y la capacidad del sistema. Esta solución no deja de tener inconvenientes; entre ellos figura el exceso de coste que supone el empleo de dobles motores para cada generador en las subestaciones, motores que primero trabajan en serie y después en paralelo; además sólo es aplicable cuando las líneas son largas y costosas. Se ha empleado en la línea Montier-Lyon, donde se ha empezado con una corriente de 75 amperios, que cuando sea necesario se elevará á 150.

La densidad de corriente en los conductores se determina tomando como base las pérdidas de energía y de voltaje admitidas. Con la distribución en derivado no deben ser muy grandes, porque entonces, con carga máxima, serían excesivas, y la regulación se haría en malas condiciones; no hay que olvidar que las pérdidas de energía con carga máxima representan mucho dinero, por cuya razón es de mucho interés conocer su valor.

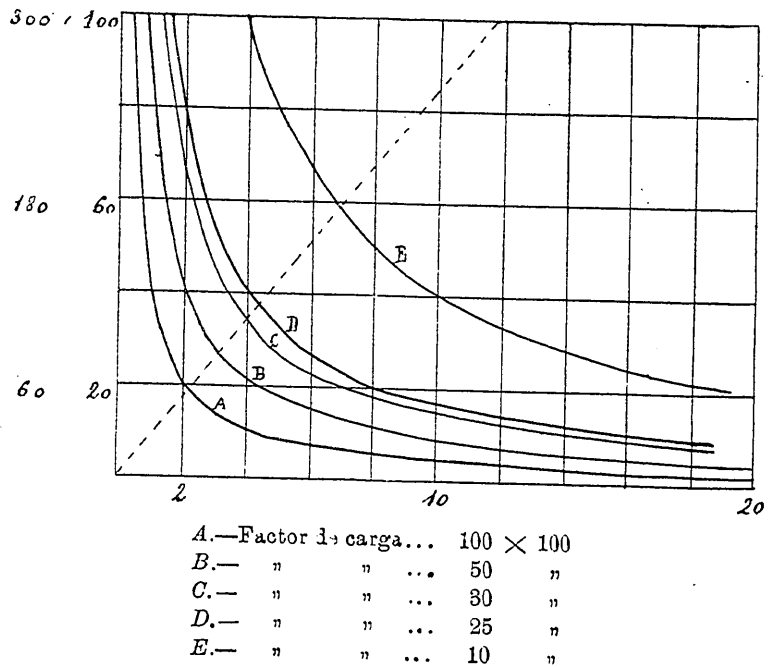
Cuando la potencia que se ha de aplicar á los generadores

proceda de motores hidráulicos ó de vapor, se obtiene á poco precio; las pérdidas de energía en la línea tienen poca importancia, sucediendo todo lo contrario cuando aquel precio es elevado; en este último caso la densidad de corriente tendrá que ser menor en el sistema serie que en el derivado.

Las pérdidas de energía producidas por una corriente continua son á veces muy grandes, pero lo interesante es el dinero que representan; sucede en electricidad lo que en muchas cuestiones de ingeniería que, consideradas científicamente, parece que tienen una importancia muy grande, mientras que desde el punto de vista comercial sucede todo lo contrario.

En la figura 6.^a se han representado varias curvas, cuyas abscisas son las pérdidas de energía en la línea por cada 15 kilómetros

Fig. 6.^a



Los números de la izquierda representan amperios y los inferiores los kilovatios correspondientes perdidos en la línea por cada 15 kilómetros, y se refieren á la línea de puntos.

expresadas en tantos por ciento de la carga, y las ordenadas el tanto por ciento de la carga definitiva para que la instalación se ha establecido; para cada factor de carga se ha dibujado su curva especial; en todas se ha supuesto un voltaje de 100.000 voltios y una densidad de corriente de 0,78 amperios por milímetro cuadrado. Examinando las curvas se observará que si la línea transporta toda la energía de que es capaz cuando el factor de carga es 100, las pérdidas son 41 por 100 por 15 kilómetros, mientras que si aquel factor es 25, las pérdidas son 1,64 por 100; si al empezar á funcionar la instalación la carga máxima es el 25 por 100 de la definitiva, las pérdidas son 1,64 por 100 si el factor de carga es 100, y 6,56 por 100 si es 25. Las curvas son muy útiles para determinar la corriente de la línea para cualquier carga fija ó creciente y para diferentes factores de carga. Si el voltaje fuera inferior á 100.000 voltios, las escalas de las curvas deben reducirse en la misma relación que disminuye el voltaje.

Si la corriente de la línea se disminuyera en un 30 por 100 cuando la carga es pequeña, claro es que se mejoraría notablemente el rendimiento de aquélla.

En resumen, todo problema de transporte de energía eléctrica debe resolverse estudiando muy detenidamente los diferentes factores que en él tienen mayor ó menor influencia, entre los cuales figura en primer lugar la intensidad de la corriente en la línea.

Sistemas de transmisión.—Son tres los que pueden emplearse: 1.º, con dos conductores; 2.º, con un solo conductor y tierra, y 3.º con dos conductores y tierra.

Cuando el voltaje entre los conductores no pasa de 25.000

voltios, se adopta generalmente el sistema bifilar, siempre que el aislamiento de la línea y el de todos los elementos de la instalación reúna condiciones para resistir los 25.000 voltios cuando uno de los polos extremos de los generadores en serie toma tierra; en este sistema, aunque cualquier punto de la línea tome tierra, el servicio continuará sin interrupción alguna y la avería se podrá reparar con seguridad y facilidad sin más que dar tierra á dos puntos de la línea que comprendan entre sí á aquélla, mientras se verifica el trabajo, procedimiento que se usa mucho en las instalaciones hechas por Tury en Suiza. Como la corriente de la línea es por regla general muy pequeña, no suele pasar de 200 amperios, y además es continua, no hay que temer que produzca perturbaciones en las líneas telefónicas próximas. En el sistema bifilar se enlazan á la línea los receptores con mucha sencillez; basta dirigir la corriente por tierra entre los puntos en que hay que trabajar.

El sistema trifilar es sencillamente el bifilar, en el que se da tierra á un punto tal, que á uno y otro lado de él haya el mismo número de generadores, con lo cual se reduce el voltaje de cada lado de la línea á la mitad del de trabajo, el cual puede duplicarse si se conserva el mismo aislamiento. Con relación al bifilar tiene el inconveniente de que si algún punto de la línea toma tierra, parte de la instalación dejará de funcionar, excepto cuando á uno y otro lado de aquél los receptores formen dos grupos completamente iguales; el caso más desfavorable ocurre cuando el punto que toma tierra está muy próximo á la central, porque entonces la mitad de los receptores se pararán.

Cuando la intensidad de la corriente es relativamente pequeña, es posible en campo abierto hacer uso de la tierra para conductor de vuelta, teniendo cuidado de hacer las conexiones con éste en forma tal, que no se puedan destruir rápidamente por los efectos de electrolisis. Á pérdidas iguales, el gasto de cobre es la cuarta parte del correspondiente á dos conductores, puesto que la resistencia de la tierra es despreciable.

Para fijar las ideas consideramos el siguiente caso práctico: se trata de transportar 10.000 kilovatios á 160 kilómetros con un voltaje de 50.000 voltios, y, por lo tanto, con una intensidad de corriente de 200 amperios, empleando dos cables de 200 milímetros cuadrados de sección que pesan aproximadamente 538.660 kilogramos; las pérdidas serían de 10 por 100. Haciendo uso de la tierra para conductor de vuelta y con las mismas pérdidas, la sección del otro sería 100 milímetros cuadrados y su peso 134.665 kilogramos. Si se emplean dos conductores y la tierra como neutro, podrá elevarse el voltaje á 100.000 voltios y reducirse la intensidad de la corriente á 100 amperios, constituyéndose la línea con dos conductores de 50 milímetros cuadrados de sección que pesan 134.665 kilogramos. Este sistema es más caro que el anterior, pero es más seguro.

Con objeto de adquirir algún conocimiento sobre los efectos que sobre las líneas telefónicas ó sobre cualquier otro circuito pudiera producir el empleo de la tierra como conductor de vuelta, se hicieron varios experimentos á principios de 1902 en la línea S. Mauricio-Lausana, en la cual se envió varias veces toda la energía por uno solo de los conductores aislados, verificando la vuelta por tierra por medio de los pararrayos y con un voltaje de 23.000 voltios. La única diferencia que se observó entre la transmisión bifilar y la de un solo conductor se redujo á que las pérdidas eran menores en este último caso.

También se hicieron experimentos con análogo objeto en Lancey por una Comisión nombrada por el Gobierno francés, y de acuerdo con M. Thury, sobre una línea cuya corriente tenía 110 amperios de intensidad. Los resultados obtenidos confirmaron las de San Mauricio; se observó que las pérdidas de energía eran proporcionales á la densidad de corriente, así como que la zona de terreno electrizada llega á muy poca profundidad; la caída de voltaje sólo es sensible muy cerca de las placas que dan tierra. En las líneas telegráficas y telefónicas tampoco se notó perturbación alguna.

Con objeto de evitar que se produzcan perturbaciones en la

superficie del terreno que pudieran dar lugar á averías en las tuberías ó en cualquier otra construcción metálica, las tomas de tierra se deben hacer en la siguiente forma: se abre un pozo de suficiente profundidad para que su fondo quede á bastante distancia de cualquier cuerpo metálico y para poder colocar en aquél una capa bastante gruesa de una substancia muy conductora; en el fondo se coloca una masa de metal que se enlaza con un cable al elemento correspondiente de la instalación. Procediendo así, y dada la pequeña intensidad de las corrientes que generalmente se emplean, hay seguridad completa de que no se producirán perturbaciones en la superficie del terreno.

Descripción del sistema de distribución en serie con corriente continua.—Hay que considerar en este sistema tres elementos principales: 1.º, la central; 2.º, la línea; y 3.º, la subestación.

Como el voltaje de uno de los generadores tiene que ser igual á la diferencia de potencial máxima entre la línea y tierra, y como por otra parte, es imposible aislar los devanados de la armadura y de los campos para resistir voltajes tan altos, ha sido preciso adoptar una solución radical y anticuada, que se reduce á aislar el generador de tierra y enlazarle con el motor por medio de embragues constituidos con materiales aisladores; entonces, para que el personal de la central pueda trabajar con seguridad, hay que aislar también el pavimento que rodea á los generadores en la extensión necesaria para que sea imposible ponerse al mismo tiempo en contacto con aquéllos y con tierra. La manera más corriente de realizar lo que se acaba de decir consiste en construir el pavimento que rodea á los generadores y el que se extiende por debajo de éstos con una capa de hormigón de asfalto, cuya cara superior se enluzca con asfalto puro; el basamento de los generadores no se apoya directamente sobre el asfalto, sino sobre aisladores embutidos en el hormigón. Los embragues más usados son el de Zodal ó el de Raffard, así como el constituido por dos discos enlazados con pernos que se aíslan de aquéllos con ebonita. En las últimas instalaciones hechas por M. Thury pone además un embrague de fricción que desliza cuando la carga excede en un 20 por 100 á la máxima, con lo cual se evitan averías en los generadores cuando se produce algún cortacircuito repentino. Con el método de aislamiento descrito no hay peligro alguno al manejar las máquinas á alta tensión, ni al limpiar los conmutadores ó al hacer cualquier otro trabajo análogo pueden tratarse todos los aparatos como si sus voltajes fueran pequeños.

El cuadro de la línea necesita un amperímetro, un voltímetro y los conmutadores correspondientes, así como algunos pararrayos. Generalmente parten dos conductores de la central, pero también algunas veces pueden ser cuatro, constituyendo dos líneas que si se desea pueden trabajar en paralelo; si se hace uso de la tierra para conductor de vuelta el número de aquéllos es menor.

Cada grupo electrógeno dispone de un conmutador de cuatro polos, de un amperímetro y de un voltímetro, aparatos que generalmente se montan sobre una columna aislada eléctricamente.

Todo sistema eléctrico puede proyectarse con arreglo á los dos principios generales siguientes: el primero consiste en instalar suficiente número de máquinas de reserva y cables, así como de aparatos de seguridad, de tal manera que si algún elemento se inutiliza estos últimos aparatos le aíslen, y eviten así la interrupción del servicio; principio que predominó en las primeras instalaciones, hasta el punto de que las tuberías de vapor y sus válvulas eran dobles. El segundo, mucho mejor que el primero, consiste en hacer la instalación de la manera más perfecta posible, reduciendo á un número muy pequeño las probabilidades de averías, así como los aparatos de seguridad.

Con el sistema de distribución en serie con corriente continua es imposible establecer más de una línea si la potencia de la central es pequeña, y más de dos si es grande, razón por la cual es muy reducido el número de aparatos de seguridad que son necesarios, al contrario de lo que sucede con la distri-

bución en derivado, aparatos que, dicho sea de paso, no siempre funcionan en la forma prevista.

El aparato de seguridad hasta ahora empleado para el caso de inutilización de un motor se reduce á un conmutador que mecánica ó automáticamente pone en corto circuito el generador correspondiente si cambia el sentido de su rotación por efecto de la parada de aquél. El embrague por adherencia protege al motor cuando se establece un corto circuito instantáneo y es muy práctico, según ha demostrado la experiencia.

Con todas las instalaciones que se han hecho, según el sistema serie, emplean turbinas hidráulicas, que por cierto no son los motores más indicados para los dinamos serie. Éstos exigen un par constante cuando trabajan, produciendo corriente de intensidad, también constante, en cuyo caso la mejor manera de regular es por variación de la velocidad; ahora bien, el par de la turbina crece cuando la velocidad disminuye, alcanzando un valor máximo, que es el doble del que corresponde á la velocidad máxima; si el desnivel es constante, para que la turbina conserve su rendimiento máximo la velocidad no debe variar, á pesar de lo cual en casi todas las instalaciones se regula modificando la velocidad de las turbinas. Sin embargo, si es preciso que con todas las cargas el rendimiento sea máximo, los generadores deberán funcionar con velocidad constante y se regulará con la posición de las escobillas.

Existen muy pocos generadores serie movidos con motores de vapor, y los que hay son todos de pequeña potencia, razón por la cual se carece de bastante experiencia para poder dedu-

cir consecuencias generales; ahora bien, como el par de un motor de vapor con expansión constante es también constante y no aumenta en la misma forma que el de la turbina hidráulica, se deduce que el embrague por adherencia no es tan necesario en aquél como en ésta. Tendría, sin embargo, la ventaja de que si ocurriera un corto circuito muy violento y suficiente para detener el motor, su efecto sería mayor que el correspondiente á los elementos en movimiento del motor de vapor, que es análogo al de un volante.

Los electromotores no disponen de más aparatos de seguridad que de un conmutador de corto circuito movido por un solenoide que entra en acción cuando el voltaje entre escobillas es superior á un cierto valor, y el cual permite parar el motor si por cualquier motivo se le carga demasiado, así como mantener la continuidad de la línea si hay que hacer alguna reparación en el motor.

La corriente de la línea se puede regular de dos maneras: variando la velocidad del motor y manteniendo fijas las escobillas, ó cambiando la posición de éstas sin modificar la velocidad de aquél; en uno y en otro caso se usa el mismo tipo de aparato, constituido en esencia por un mecanismo que la corriente mueve en sentidos contrarios, según que la intensidad de la corriente sea mayor ó menor que la normal, movimiento que á su vez se transmite á los reguladores de los motores ó á las escobillas. El elemento principal del aparato regulador es un motor de un cuarto de caballo montado en serie con la línea, pero con una resistencia en paralelo, porque no necesita toda la corrien-

Quadro I.

INSTALACIÓN	Fecha de la instalación.	Corriente en la línea. — Amperios	Longitud total de la línea. — Kilómetros.	GENERADORES					Voltaje total de la línea. — Voltios.	OBSERVACIONES
				Número.	Voltios.	Kilovatios.	Número de revoluciones.	Potencia total.		
								Kilovatios.		
Sociedad Acueducto de Ferrari-Galliers (Italia).....	1889.....	45	120	18	"	"	"	680	14.000	Circuito cerrado. Idem.
Wasserwerke Zug (Suiza)...	1891.....	50	25	5	1.600	89	320	400	8.000	
Papelerías de Biberist (Suiza)...	1893.....	40	37	2	3.400	"	"	272	6.800	
Municipios de Val de Travers (Suiza).....	1895.....	65	35	3	2.600	186	260	590	9.100	Idem.
Sociedad de Electricidad de Brescia (Italia).....	1895.....	50	52	1	1.800	98	450	525	10.500	
Sociedad de Electricidad de Romande (Suiza).....	1895.....	50	36	3	3.000	"	"	700	14.000	Idem.
Municipio de Chaux de Fonds y Locle (Suiza).....	1896.....	150	52	4	1.800	238	300	1.390	12.000	
Centrales Eléctricas de Eisenbourg (Hungria), Ikewar-Steinamanger.....	1896.....	65	65	7	1.500	112	260	585	9.000	Idem.
La Papelera Española, Rentería (España).....	1896.....	65	23	6	2.600	186	"	855	13.280	
Sociedad Industrial de Electricidad (Bieiti-Italia).....	1896.....	30	60	2	2.740	194	"	860	12.000	Idem.
M. V. J. Dunand (Batoum-Rusia).....	1899.....	50	20	4	3.000	"	"	130	2.600	
Centrales Eléctricas de Eisenbourg (Hungria) Ikewar-Sopren.....	1899.....	40	120	2	1.300	"	"	400	10.000	Idem.
Minas de plomo de Linares (España).....	1900.....	60	60	4	2.500	112	"	400	10.000	
San Mauricio Lausana.....	1902.....	150	112	3	3.500	238	320	680	10.500	
Moutiers Lyon.....	1906.....	75	360	6	2.250	373	300	4.000	27.000	56 kilómetros de circuito abierto. La línea sirve á dos centros locales antes de llegar á Lausana.
										180 kilómetros de circuito abierto. Los cables subterráneos trabajan al voltaje total.

te; en paralelo también, con relación al motor y á su resistencia, se colocan dos ó tres acumuladores con objeto de que el motor no se pare cuando falte la corriente de la línea.

Un aparato análogo se emplea para regular la velocidad de los electromotores, modificando la posición de las escobillas; su acción es tan rápida, que en tres segundos pueden éstas pasar de una posición extrema á la otra; para asegurar la acción del regulador se disponen amortiguadores de líquidos.

En las primeras instalaciones, tanto la corriente de la línea, como la velocidad de los electromotores, se regulaba en parte con la intensidad de los campos, y en parte con la posición de las escobillas, cuyas variaciones se verificaban con un solo aparato; hoy día sólo se modifica la última. Los generadores y motores eléctricos que actualmente se construyen no producen chispas cualquiera que sea la posición de las escobillas, hecho debido á que aquéllos se proyectan en forma tal, que los campos producidos por el inducido y por los inductores son iguales y se neutralizan cuando la posición de las escobillas es la que corresponde al reposo. Las máquinas construidas por M. Thury con escobillas de carbón funcionan perfectamente con todas las cargas; la conmutación no ofrece dificultades y los colectores constantemente están brillantes. Las máquinas de la instalación de Chaux de Fonds, citada en el Cuadro I, están funcionando desde hace once años con escobillas de carbón y en tan buenas condiciones, que únicamente una vez al mes hay necesidad de reparar y limpiar los colectores.

Motores.—La disposición general de una central depende principalmente de la clase de motores; pero cualquiera que sea ésta, y siempre que sea posible, se parte de la base de que la corriente en la línea se mantiene constante por variación de la velocidad de los generadores y no por el cambio de posición de las escobillas, porque el primer sistema es mucho más sencillo que el segundo.

Cuando la energía no se transmite directamente desde la central á los receptores sino por el intermedio de subestaciones con transformadores rotativos, es á éstos á los que se dota con volantes de preferencia á los generadores, sobre todo cuando las cargas fluctúan mucho, y muy particularmente con el sistema de distribución en serie; cada subgenerador debe tener su volante, el cual amortigua las oscilaciones bruscas de la línea secundaria, impidiendo que se transmitan á la primaria y á la central, cuyos generadores no necesitan volantes, son suficientes los de la subestación para regular de una manera automática toda la instalación. No parece aceptable ni racional el sistema que generalmente se sigue con la distribución en paralelo de proveer con grandes volantes á los generadores de la central y no establecerlos en aquellos elementos que experimentan más directamente la acción de la carga.

a) *Máquinas de vapor.*—La mayor parte de las instalaciones hechas por M. Thury utilizan motores hidráulicos, y las pocas que las tienen de vapor son de potencia muy pequeña, de las cuales pocas enseñanzas se pueden sacar para aplicarlas á instalaciones análogas, pero de gran potencia. No hay dificultad alguna para que los generadores funcionen á velocidad constante, puesto que variando la posición de las escobillas se puede conservar invariable la intensidad de la corriente; ahora bien, como el par resistente de un dinamo serie de corriente constante es también constante cualquiera que sea la carga, el regulador no es necesario, habiéndose prescindido de él en todas las instalaciones. Toda máquina de vapor que trabaja con expansión constante, consumiendo una cantidad de vapor fija y determinada por carrera de émbolo, tiene también constante su par motor; por lo tanto, si á un motor de estas condiciones se acopla un dinamo serie de corriente constante, su velocidad de rotación será aquella para la cual los dos pares se equilibran, y dependerá de la intensidad de la corriente y del grado de expansión, en la hipótesis de que la presión del vapor es constante; si el motor acelera su marcha, aumentará la intensidad de la corriente y con ella el par resistente; si, por el contrario, la velocidad

del motor disminuye, disminuirá también el par resistente, y, por lo tanto, aquélla crecerá. De lo que se acaba de decir se deduce que si los terminales del dinamo se ponen en corto circuito, el motor girará en un principio con lentitud, pero produciendo el primero la corriente normal; si, por el contrario, la resistencia del circuito exterior aumenta por efecto de una carga, la corriente de la línea tiene tendencia á disminuir, y lo mismo sucederá con el par resistente, lo cual produce el aumento de la velocidad del motor, cuyo par es constante. En resumen, cuando la carga crece por un aumento de la resistencia del circuito, la velocidad crece también y con ella el voltaje, y si por el mismo motivo la carga disminuye, la velocidad se reduce igualmente. Podría creerse que este sistema no es conveniente cuando hay instalados varios dinamos en serie, porque uno de los motores podría tomar más carga de la que le corresponde al aumentar ésta, pero este efecto no es de temer, porque las contracciones que sufre la corriente de vapor por la gran velocidad que toma con las cargas grandes son suficientes para prevenir aquel efecto. Trabajando en estas condiciones deben usarse volantes pequeños.

b) *Turbinas de vapor.*—Hasta la fecha no se han construido dinamos de alta tensión que puedan funcionar con la velocidad de las turbinas de vapor, y seguramente habrá que vencer muchas dificultades antes de resolver el problema de aplicar estos motores en las instalaciones eléctricas de corriente continua, problema que M. Hobart no le cree de solución imposible. La turbina de vapor tendría un par constante si la cantidad de vapor consumido por un número de vueltas determinado no variase, como sucede en las turbinas Parsons. No hay datos suficientes para comparar los rendimientos de las turbinas con diferentes cargas cuando la velocidad es la normal ó con velocidades variables y par constante.

c) *Turbinas hidráulicas.*—Como ya se ha dicho, la mayoría de las instalaciones establecidas por M. Thury emplean como motores estas turbinas, las cuales dan lugar á más dificultades que los motores de vapor porque su par no es constante, es muy grande cuando la velocidad es muy pequeña, circunstancia que es motivo suficiente para justificar el uso del embrague de adherencia. El voltaje se regula modificando la velocidad con un aparato ideado por M. Thury, que actúa sobre las compuertas de todas las turbinas y cuyo funcionamiento es tal, que la intensidad de la corriente es constante en todo el sistema. Es bien sabido que cuando la velocidad lineal en la periferia de la turbina no tiene el valor que le corresponde, el rendimiento baja rápidamente, por cuya razón en las instalaciones hidroeléctricas que tienen variable la altura de caída del agua se modifica la velocidad al mismo tiempo que aquélla varía con objeto de utilizar el agua lo más económicamente posible; solución que no puede aceptarse cuando la corriente es alterna, pero que es la natural y corriente en el sistema serie. Hay muchos casos en que esta posibilidad de adaptar la velocidad de la turbina á la altura del salto permite obtener una cantidad de energía mucho mayor que si la velocidad fuera constante.

d) *Motores de gas.*—Un solo caso existe de generador serie con motor de gas trabajando á toda carga, sirviéndose de otras máquinas en serie para regular. Parece que con admisión de gas constante el motor trabaja con par también constante entre ciertos límites de velocidad, que suelen ser la máxima y su mitad, por lo cual no necesita regulador; si fuera preciso trabajar con velocidad constante, habría que mover la posición de las escobillas para conservar invariable la intensidad de la corriente.

Línea.—Cuando es aérea se establecen dos conductores y algunas veces cuatro, enlazados cada dos en paralelo, constituyendo así un solo conductor; pero de no usar postes independientes para cada uno de ellos, es más seguro establecer dos conductores nada más, con lo cual el número de aisladores es la mitad. Si la línea ha de ir enterrada, lo más seguro y más práctico es disponer dos conductores independientes; para mayor seguridad podría constituirse cada uno de aquéllos por dos ó tres en pa-

ralelo, con una densidad de corriente tal que si se inutiliza uno los restantes puedan admitir toda la corriente de la línea; pero esta disposición no es de absoluta necesidad hoy día que se construyen los cables con mucha perfección y no son de temer averías si su colocación se hace con todo cuidado; únicamente está justificada en aquellas instalaciones de importancia en las que una avería en un conductor suspendiera todo el servicio.-Ω.

(Se continuará.)

TRANVIA DE CLERMONT FERRAND Á PUY DE DÔME

Á VAPOR Y MECANISMOS DE ADHERENCIA SUPLEMENTARIA

El proyecto de un tranvía de Clermont Ferrand á Puy de Dôme, frecuentado cada año por numerosos turistas, está en estudio desde hace largo tiempo. Diversos proyectos que proponían un camino de hierro ordinario con simple adherencia, con cremallera, ó bien con la asociación de un funicular, fueron rechazados por razones técnicas ó financieras. Se trata de salvar rápidamente una diferencia de altura de más de 1.000 metros, y por razón de la naturaleza del suelo, los gastos de establecimiento y conservación de estas diversas vías férreas hubieran sido muy elevados, especialmente en las regiones más altas.

Le Puy de Dôme está, efectivamente, formado de una traquita bastante blanda que es difícil de retener sobre los terraplenes y encima de altas trincheras, principalmente á causa de las tempestades y de los deshielos.

Por otra parte, la velocidad del viento es siempre bastante grande, alcanzando frecuentemente 30 ó 40 metros por segundo y pudiendo llegar á 76. Tales velocidades exigen el empleo de precauciones especiales para evitar el deterioro del material móvil. Además, por causa de la naturaleza terrosa del terreno, estas velocidades pueden acrecentar los gastos de conservación de una vía férrea. Así que, según vemos en *El Ingeniero Civil* (número 10 de Noviembre de 1906), el sistema de tracción empleado es uno especial que consiste en la unión á una locomotora de vapor ordinaria, de un mecanismo de adherencia suplementaria, constituida por ruedas horizontales que se apoyan sobre un carril central y que permiten trepar muy fuertes rampas.

Esta disposición impide el descarrilamiento del material móvil sobre el cual está aplicado. Permite emplear radios de poca curvatura. El precio del establecimiento del carril central es, desde luego, mucho más económico que el de una cremallera (8 á 10 francos el metro lineal, en vez de 30 ó 40).

La línea de tranvías de Clermont Ferrand á Puy de Dôme presenta declives máximos de 120 milímetros; el carril central no existe más que sobre los que alcanzan ó pasan de 60 milímetros, ó sea sobre una longitud de 8.460 metros.

El ancho de la vía es de un metro; los carriles normales son del tipo Vignole, de acero y de un peso de 25 kilogramos por metro lineal.

El carril central está montado sobre soportes fijos en medio de traviesas de madera por medio de tirafondos. Este carril, del tipo de doble cabeza, pesa 27 kilogramos el metro lineal, y su mayor saliente por encima de la superficie de rodadura es de 0^m,18; está adelgazado en forma de silbato en sus extremos para la entrada de las ruedas horizontales, lo que evita exigir una gran precisión en su asiento.

El mismo principio, según el cual es conocido el mecanismo de las ruedas horizontales, permite desde luego una variación de la forma y del ancho del carril central, porque este mecanismo funciona como si estuviera articulado en un punto del bastidor de la máquina.

Es de notar que el saliente del carril central no constituye

un inconveniente serio para la libre circulación sobre las vías públicas, porque sobre las carreteras la vía se establece á un lado, no accesible á los carruajes ordinarios, y en los pasos á nivel y en los cruces el carril central está interrumpido, lo mismo que á las entradas de las propiedades. La pequeña distancia que separa las extremidades del carril está salvada por efecto de la simple adherencia, aumentada ésta por la inercia del tren, debida á la velocidad adquirida. En la mayor parte de los casos, desde luego la pendiente es pequeña, ó nula en los pasos á nivel, y los dos grupos de ruedas horizontales constituyen el mecanismo de adherencia suplementaria, que están colocados cada uno á una de las extremidades de la locomotora y distantes 4^m,26 de eje á eje; uno de los grupos toma, ó está á punto de tomar, el carril cuando el otro lo deja.

Las locomotoras no presentan nada de particular, aparte de sus mecanismos de ruedas horizontales y de sus accesorios. Son de tipo á cilindros exteriores y á tres ejes acoplados.

La presión de las ruedas horizontales contra el carril central está producida por un cilindro de adherencia de aire comprimido, fijado á las riostras de los largueros y comunicando con el depósito de aire comprimido de la máquina por medio de una llave y de un distribuidor automático de presiones de aire proporcionalmente á los declives.

La locomotora está siempre en cabeza del tren, pero llevado siempre la chimenea detrás, tanto á la subida como á la bajada, de modo que el mecánico tenga siempre la vía directamente á su vista.

Los coches de remolque están provistos de un par de rodillos horizontales montados sobre bogias, sirviendo únicamente para el refrenado actuando sobre el carril central.

Creemos de interés indicar seguidamente cómo se establece la adherencia necesaria para remolcar un tren en las condiciones de marcha más desfavorables, es decir, suponiendo un tren compuesto de tres remolques que deben subir la rampa máxima de 120 milímetros en curva de 60 metros de radio en el momento en que el coeficiente de adherencia está reducido al minimum, ó sea $\frac{1}{11}$:

Peso reducido de la locomotora.....	32 toneladas.
Peso de tres remolques cargados.....	27 idem.
Peso total del tren.....	59 idem.
Presión total de cuatro ruedas horizontales contra el carril central.....	50 idem.
Presión total sobre los tres carriles: 32 + 50 =	82 idem.
Presión del aire correspondiente en los cilindros de adherencia.....	7.670 kilogramos.
Adherencia total de la locomotora: $82 \times \frac{1}{11}$	7.454 idem.

Resistencia de la locomotora sobre rampa de 120 por causa de la gravedad:

Ciento veinte kilogramos por tonelada, ó sea $0^t 120 \times 32$ 3.840 toneladas.

Resistencia de los remolques por tonelada:

Por la gravedad.....	120	} 128 kilogramos.
Por rozamientos en las curvas de 60 metros	8	
Resistencia total de los remolques $0^t 128 \times 27$		3.456 toneladas.
Resistencia total del tren: $3^t 848 + 3^t 456 =$		7.296 idem.
Diferencia entre la adherencia y el coeficiente de adherencia $\frac{1}{11}$: $7.454 - 7.296 =$		3,153 idem.

O.