

REVISTA DE OBRAS PUBLICAS

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, 6, primero derecha.

LOS FERROCARRILES ELÉCTRICOS ⁽¹⁾

La transformación de los ferrocarriles de vapor por eléctricos ha tenido en estos últimos años un gran progreso, por lo cual juzgamos interesante dar á conocer á nuestros lectores un trabajo sobre este importante asunto, debido á M. de Marchena, Subdirector de la *Sociedad Thompson-Houston*, en París, cuyo trabajo fué presentado en el último Congreso de la Asociación Francesa para el Progreso de las Ciencias.

Este interesante estudio sobre los ferrocarriles eléctricos ha sido publicado por la *Revue Scientifique*, y de esta importante revista tomamos los puntos más interesantes.

En los países que, como Suecia, Suiza, Alemania é Italia, los ferrocarriles son propiedad del Estado, la transformación de la tracción á vapor por la eléctrica se ha hecho rápidamente; pero no ha sucedido así en los demás países europeos en los cuales los ferrocarriles son propiedad de Empresas particulares que no han querido aventurarse á efectuar la transformación, y sólo alguna de estas Empresas ha hecho ensayos en trozos de la línea.

En América la transformación de los ferrocarriles de vapor se ha efectuado con mucha más rapidez que en Europa, y como es natural, se han podido hacer en estos ferrocarriles americanos una infinidad de estudios para mejorar los sistemas eléctricos de tracción. El problema no se limita á transformar las locomotoras de vapor por eléctricas, asegurando una economía que compense los gastos de instalación; es necesario tener siempre en cuenta las mejoras que en las diferentes especies del tráfico puedan aumentar su potencia total de transporte. Estas mejoras traerán consigo modificaciones radicales en los actuales sistemas de explotación. Sin embargo, la transformación no podrá hacerse más que gradualmente, y debemos pasar durante algún tiempo por el período de transición en el cual no podremos conseguir en la explotación todas las modificaciones que serían deseables.

Resulta que, sobre todo al principio, las locomotoras eléctricas harían, poco más ó menos, el servicio actual de las locomotoras de vapor; pero está plenamente demostrado, á pesar del empleo tan frecuente de los coches automotores, que las locomotoras constituyen el mejor medio de tracción

para los trenes de grandes recorridos, y sobre todo cuando estos recorridos tienen gran movimiento de mercancías, y en los cuales debemos llegar al límite de capacidad de transporte. Es evidente que para estos recorridos de gran movimiento de mercancías la locomotora eléctrica ejercerá por completo un monopolio.

El problema de la locomotora eléctrica es, por lo tanto, importantísimo de resolver, y debemos tender no sólo á sobrepasar á la locomotora de vapor en algunas ocasiones, sino á que sea superior á ella, bajo todos los aspectos: rapidez, potencia, facilidad en su manejo, conservación de vías, etcétera, etc.

Dos puntos importantes tenemos que considerar:

- 1.º Constitución mecánica de la locomotora eléctrica.
- 2.º Constitución eléctrica.

Constitución mecánica.—Cuando se trata de potencias y velocidades poco elevadas, este problema es sencillo. La dificultad se presenta cuando la velocidad y la potencia deben alcanzar sus límites.

Para las locomotoras de mercancías, cuyas velocidades serán siempre moderadas, el empleo de los engranajes, tan extendido hoy día, puede aceptarse por completo, y nos permite emplear motores eléctricos de una potencia individual de 250 HP, en los cuales la mitad de su peso—2.500 kilogramos aproximadamente—descansa directamente sobre los ejes sin suspensión elástica.

Este sistema da muchas facilidades para el montaje de los motores, su inspección y su conservación; se hacen independientes las velocidades respectivas del eje y del motor, y permite con un mismo tipo de motor tener locomotoras de características muy diferentes, según las aplicaciones á que se destinan.

Las locomotoras eléctricas de mercancías deben ser de adherencia total. Para potencias inferiores á 1.000 HP se podrá adoptar *chassis* rígidos de tres ó cuatro ejes motores; para potencias superiores cuatro ejes motores no son suficientes, y como entonces se dificulta la rigidez, se emplean secciones articuladas que llevan cada una tres ó cuatro ejes motores. Tendremos de este modo locomotoras que pueden desarrollar á una gran velocidad un esfuerzo de tracción superior al desarrollado por las más potentes máquinas de vapor actuales y, además, teniendo un peso muerto y una carga por eje sensiblemente menores, con lo cual se deterioran mucho menos las vías.

Para las locomotoras eléctricas de gran velocidad la so-

(1) De Ingeniería.

lución es más difícil. Á partir de 80 kilómetros por hora, la transmisión por engranajes deja de ser práctica. Además, como el diámetro de las ruedas motoras está forzosamente limitado, se llega bien pronto á un momento en el cual la velocidad del eje, 400 vueltas por minuto, corresponde casi á la que sería necesario adoptar para el motor mismo; además, no hay razones para interponer órganos reductores de la velocidad entre los motores y los ejes.

Para las locomotoras de gran velocidad no deben emplearse más que motores que giren á la misma velocidad que el eje. Para esto tenemos cuatro soluciones.

Una de estas soluciones consiste en calar el rotor del motor sobre un árbol hueco, concéntrico al eje y acoplado concéntricamente á él. Las partes fijas de la coraza del motor están fijas al *chassis* y, por consiguiente, provistas de resortes de suspensión. El árbol hueco debe tener un diámetro interior suficiente para permitir las oscilaciones del *chassis* con relación á los ejes. El juego necesario es próximamente de 40 milímetros, lo que obliga á dar á este árbol un diámetro exterior de 300 milímetros próximamente. Esta solución es la empleada en las grandes locomotoras del Baltimore y Ohio, en los ensayos de la línea de Zossen, y también en las locomotoras monofásicas de New York, New-Haven y Hartford.

Con este sistema el peso del motor está suspendido elásticamente con relación á los ejes, y las reacciones sobre las vías quedan reducidas al mínimo. Por el contrario, los cojinetes del árbol hueco tienen un gran diámetro, que da lugar á velocidades periféricas elevadas, y tanto mayores cuanto que el diámetro de las ruedas motoras es menor; en Zossen llegan hasta 12,50 metros, por consecuencia de la enorme velocidad alcanzada (215 kilómetros por hora); sin embargo de esto, hasta el presente no han tenido ningún entorpecimiento de importancia.

La segunda solución consiste en colocar los motores independientes de los ejes y unidos por bielas y manivelas. Este sistema, en el cual el peso del motor está por completo suspendido, ha sido ideado por M. M. Ganuz y M. Brown y Boveri, dando grandes resultados en las aplicaciones.

Una tercera solución fué ideada por M. Auvert, Ingeniero de la *Compañía P. L. M.*, y consiste en calar el inducido directamente sobre el eje, del cual forma parte integrante el estator, siendo fijo al *chassis*. Para permitir el desplazamiento del eje con relación al *chassis*, conservando, por lo demás, la posición del rotor con relación al estator, la coraza del estator está dividida en dos partes, suspendidas por su centro de gravedad, centradas con relación del eje y de tal modo, que puedan tener un ligero movimiento de oscilación. Esta disposición ha sido adoptada por la *Compañía P. L. M.*, y posteriormente ha sufrido bastantes perfeccionamientos.

Otra solución es la adoptada en las locomotoras de la *New-York Central*; los estator están por completo independientes de los rotor y calados directamente sobre los ejes; las piezas polares tienen una forma conveniente y un entrehierro suficiente para dejar libre el desplazamiento. Esta disposición es de notable sencillez, puesto que suprime todo mecanismo; toda coraza especial y el circuito magnético, están constituidos por el *chassis* propiamente dicho de la locomotora. Más de 40 máquinas de esta clase están haciendo servicio desde hace un año con un resultado por completo satisfactorio; su sencillez, su potencia, su facilidad en el manejo y su pequeño gasto de entretenimiento, hacen de este

tipo de máquinas las más perfeccionadas que hasta ahora se conocen.

En el sistema Auvert, como en el del New-York Central, una parte del peso de los motores no está elásticamente suspendido, pero en total el peso no suspendido no pasa de los límites ordinarios admitidos para las locomotoras de vapor.

Estos dos sistemas no pueden emplearse más que con motores de corriente continua y del número de polos determinado.

Además de los ejes moleros las locomotoras eléctricas de gran velocidad deben tener aparatos directores (*boggies*) y tenerlos adelante y atrás, á fin de ser reversibles, una parte del peso total se pierde por adherencia, tanto más cuanto que para que estos aparatos cumplan su papel deben ser fuertemente cargados: un eje director de 12 toneladas, y un *boggie* de 20 aproximadamente.

La disposición mecánica de las locomotoras de la Valtaline merecen mención especial. Están provistas de un eje central dependiente del *chassis*, y de dos *boggies* adelante y atrás, con ruedas desiguales. Los ejes más próximos del eje central tienen ruedas de diámetro doble que los otros ejes.

Otra disposición ha propuesto para las locomotoras de gran velocidad, proveyéndolas por lo menos de cuatro ejes motores; consiste en llevar la máquina sobre dos *trucks*, cada uno cuatro ejes, de los cuales dos son motores y están colocados en el centro, y los otros dos son directores.

Con esta disposición se consigue dejar disponible para la adherencia el 70 por 100 del peso total, es decir, casi la misma proporción que en las máquinas de seis ejes de la New-York Central.

La constitución eléctrica de las locomotoras ha sido discutida con gran calor por los prácticos de los diferentes países, sin que hasta el presente exista una conclusión fija. Bajo el punto de vista de la unificación de las instalaciones futuras, hay gran interés en determinar las grandes reglas á las cuales convendría atenerse; pero esto no ha podido determinarse todavía por no haber conseguido los defensores de uno ú otro sistema ponerse perfectamente de acuerdo.

Examinemos, sin embargo, esta cuestión para llegar, si no á conclusiones fijas y que podrían el día de mañana desmentirse, por lo menos á algunas deducciones sobre las posibilidades actuales.

Hoy día tenemos tres sistemas:

- 1.º El sistema de corriente alterna trifásica.
- 2.º El sistema de corriente alterna monofásica.
- 3.º El sistema de corriente continua, ya en uso corriente, pero cuyo voltaje debe ser considerablemente elevado.

Veamos ahora sus características especiales, tratando de separar las que puede esperarse han de sufrir modificaciones merced á los constantes progresos de la electricidad, y las que se consideren permanentes y sin posibles modificaciones.

1.º *Sistema trifásico*.—Las primeras experiencias de tracción por motores trifásicos fueron debidas á M. Brown Boveri, hace ya más de doce años. Citaremos dentro de este sistema la línea de Bingdorf á Thun, en explotación regular desde hace diez años.

En la línea de la Valtaline, inaugurada en 1902, encontramos una importante aplicación del sistema trifásico, caracterizada por un aumento muy notable de potencia puesta en juego, un aumento de voltajes de alimentación, y la creación de un tipo nuevo y completamente original de locomotoras.

Es indudable que el motor trifásico posee cualidades muy notables en cuanto á los puntos de vista de entretenimiento, de rendimiento, de peso, de capacidad, de sobrecarga, de posibilidad de recuperación, y que puede ser superior á todos los motores de tracción; pero presenta dos inconvenientes capitales, los cuales ningún perfeccionamiento futuro podrá remediar. Estos son:

- 1.º La constancia de la velocidad.
- 2.º La necesidad para su alimentación, por lo menos de dos conductores de polaridad diferente (los carriles sirven de tercer circuito).

Sobre el primer punto, todos los Ingenieros estamos de acuerdo sobre lo molesto que resulta para los trenes de viajeros la imposibilidad de modificar la velocidad de la marcha normal. En verdad, las instalaciones antes citadas presentan combinaciones que permiten obtener diferentes velocidades de marcha, pero esto es sólo en apariencia; en realidad estas combinaciones no hacen más que disminuir las pérdidas en el arranque, y en ciertas condiciones velocidades que lleven consigo menor gasto de energía, y por último, reducir la potencia total máxima absorbida por la locomotora sobre ciertas partes del recorrido, en los cuales el esfuerzo de tracción que es preciso desarrollar es muy considerable. Estos motores no permiten nunca una regulación de la velocidad según las necesidades del servicio; en definitiva las locomotoras trifásicas deben considerarse como máquinas de velocidad constante.

Sin entrar á discutir todas las consecuencias de este hecho, nosotros diremos solamente lo siguiente: á menudo se ha perdido de vista, y sin embargo es de gran importancia práctica, que aunque los motores trifásicos trabajando sobre una misma máquina, pero en ejes diferentes, se reparten tanto peor la carga cuanto que poseen un resbalamiento menor, y por consiguiente, un rendimiento más elevado. Sobre una locomotora eléctrica los ejes motores deben estar de preferencia acoplados, lo que excluye *ipso facto* ciertos tipos de locomotoras, y no las menos interesantes.

Como consecuencia de esto dos locomotoras pueden acoplarse con gran dificultad, aun siendo idénticas se reparten mal la carga, y por lo tanto resulta imposible su acoplamiento. El empleo de unidades múltiples es, por lo tanto, impracticable.

Sobre el segundo punto, el tener que establecer además de los carriles dos contadores de toma de corriente, constituye un inconveniente de importancia. El establecimiento de un conductor único no deja ya de presentar grandes dificultades; éstas son notablemente aumentadas si es preciso establecer dos, y sobre todo teniendo potenciales tan elevadas cuya adopción es la única posible en las resistencias trifásicas.

Además el bajo factor de potencia de los motores de inducción trifásicos, la caída de tensión que resulta sobre los conductores, las pequeñas variaciones del potencial de alimentación que conviene tolerar para el buen funcionamiento de los motores de inducción, son todos inconvenientes de importancia que constituyen en conjunto un aumento considerable en los gastos de primer establecimiento de las líneas.

Estos diferentes defectos son inherentes al sistema y no pueden casi ser corregidos. Hay, pues, motivo para creer que el sistema trifásico ha dado todo lo que puede dar, y que no presenta más que un pequeño margen para el progreso futuro. Estas consideraciones impiden incluir el siste-

ma trifásico entre los que les está reservado un gran porvenir en la transformación eléctrica de los ferrocarriles.

Sobre el sistema monofásico diremos que este sistema no data más que de cinco años; pero ha tomado en poco tiempo un desarrollo considerable. Según una comunicación de M. Lamme á la *Asociación de Electricistas Americanos*, los motores establecidos según este sistema representan hoy día una potencia que pasa de 250.000 HP. Este rápido desarrollo es natural, porque desde su aparición, estos motores, por sus características especiales y por las perspectivas nuevas que presentan, han inspirado á los especialistas el más vivo interés, siendo considerados por muchos como la solución ideal de la tracción eléctrica.

En la reciente transformación de los ferrocarriles suizos se ha adoptado el sistema monofásico.

Lo mismo ha sucedido en Alemania, donde las instalaciones de ensayos de transformación de los ferrocarriles bávaros llevaron motores monofásicos.

Ahora va á ser ensayada en Francia, en la línea de Cannes á Grasse, una locomotora que recibe corriente monofásica y la transformación continua.

En los Estados Unidos, el año último, en una profunda discusión sostenida sobre la electrificación de los ferrocarriles, varios Ingenieros propusieron acordar que los motores monofásicos son la única solución posible para los ferrocarriles eléctricos.

(Continuará.)

ESTUDIO DE LA CATENARIA

Y DE SUS APLICACIONES MECANICAS

POR D JOSÉ TOUS Y BIAGGI

Académico de la Real de Ciencias y Artes de Barcelona.

(CONTINUACIÓN)

La posición de los puntos extremos (x_1, y_1) (x_2, y_2) establece:

$$y_1 - y_2 = h \quad : \quad x_1 - x_2 = d$$

ó sea:

$$\sqrt{a_1^2 + (s_m + l_1)^2} - r - \sqrt{a_2^2 + (s_m - l_2)^2} = h :$$

$$a_1 l_n \frac{\sqrt{a_1^2 + (s_m + l_1)^2} + s_m + l_1}{a_1} -$$

$$- a_2 l_n \frac{\sqrt{a_2^2 + (s_m - l_2)^2} + s_m - l_2}{a_2} - \delta = d$$

en las que sustituyendo por δr los valores deducidos de las dos anteriores dan:

$$(c) \quad \sqrt{a_1^2 + (s_m + l_1)^2} - \sqrt{a_1^2 + s_m^2} - \sqrt{a_2^2 + (s_m - l_2)^2} + \sqrt{a_2^2 + s_m^2} = h$$

$$(d) \quad a_1 l_n \frac{\sqrt{a_1^2 + (s_m + l_1)^2} + s_m + l_1}{\sqrt{a_1^2 + s_m^2} + s_m} -$$

$$- a_2 l_n \frac{\sqrt{a_2^2 + (s_m - l_2)^2} + s_m - l_2}{\sqrt{a_2^2 + s_m^2} + s_m} = d$$