

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, 6, primero derecha.

TRACCIÓN ELÉCTRICA CON CORRIENTE MONOFÁSICA ⁽¹⁾

El desarrollo constante que está experimentando la tracción monofásica ha puesto sobre el tapete multitud de problemas que requieren solución inmediata, hecho que han reconocido desde hace años las Autoridades suecas encargadas de la administración de los ferrocarriles del Estado, tanto que al decidir la sustitución del vapor por la electricidad en estas líneas, por la razón principal del precio elevado de los carbones, acordaron, en primer lugar, hacer un estudio de carácter esencialmente práctico sobre los diferentes sistemas de tracción eléctrica, para lo cual empezaron por instalar la monofásica en dos líneas de pequeña longitud cerca de Stokolmo, cuyo servicio se hizo bajo la dirección de Mr. Robert Dahlander, el cual publicó una Memoria muy minuciosa sobre los hechos observados y los resultados obtenidos, de la cual es un extracto el presente artículo.

Introducción.

Empieza la Memoria con la exposición de un resumen de los motores conocidos en la época en que comenzaron los ensayos (1903), comparando especialmente los monofásicos y trifásicos. Se ha comprobado que la red de distribución para tracción eléctrica trifásica, de las condiciones que exigen los ferrocarriles suecos, con un voltaje de 3.000 voltios, costaría por lo menos 68.750.000 francos más que la correspondiente á la monofásica á 5.000 voltios; sin embargo, en favor de la primera hay 1.870.000 francos en lo relativo á centrales y locomotoras. La diferencia de coste entre uno y otro sistema se reduciría mucho si la red de distribución del primero permitiera voltajes de 5.000 voltios. De lo expuesto se deduce que, aun teniendo presentes los inconvenientes del motor monofásico, la economía que representa es de tanta importancia que decide su aceptación.

Sin embargo, á pesar de que en el año 1903 el motor monofásico se encontraba todavía en sus principios, los perfeccionamientos de que era susceptible y los excelentes resultados que dió en América y en Alemania constituían motivos suficientes para esperar que los inconvenientes de aquel motor dejaran de influir en la seguridad de su funcio-

namiento y en el coste de éste. Se resolvió, en definitiva, que los ensayos sobre tracción eléctrica en los ferrocarriles suecos del Estado se harían con el sistema monofásico, extendiéndolos al trifásico únicamente en el caso de que los resultados del primero, por lo que se refiere á los motores, no fueran satisfactorios.

La energía necesaria para los ensayos se producía en una Central de carácter temporal instalada en Tomteboda, en condiciones tales que, tanto el voltaje como la frecuencia de la corriente, pudieran variar entre límites muy amplios. Las líneas sobre las que se hicieron los ensayos fueron la de Vartan y la de Stokolmo á Jarfra.

Las primeras se hicieron en esta última, desde el 23 de Febrero hasta el 29 de Junio de 1907, con trenes de viajeros de dos clases: unos formados con vehículos automotores, y otros con siete coches de dos ejes y una locomotora Westinghouse, sin haber tenido que lamentar accidente alguno. Después se continuaron los ensayos en la línea de Vartan, cuyo tráfico es de pequeña importancia, circunstancia que permite realizarlos en mejores condiciones.

Á pesar de que estos ensayos se hacían en escala relativamente pequeña, despertaron gran interés, principalmente porque no los realizaba ninguna Empresa industrial, interesada más ó menos directamente en un sistema especial de tracción.

Central.

Como no se disponía de un salto de agua, se instalaron motores de vapor constituídos por dos turbinas Laval, que podían producir 225 caballos, con 750 vueltas por minuto, y 270 durante breves momentos; por medio de reguladores, las vueltas podían variar desde 450 á 600, los caballos desde 210 á 240 y la frecuencia de la corriente podía ser 15, 20 y 25 períodos. La Central se dispuso con la mayor economía posible, por cuya razón se prescindió de condensadores, empleándose parte del vapor del escape en calentar el agua de alimentación. Como generadores se usaron cuatro calderas de locomotora, que trabajaban á 11 atmósferas. Además de los alternadores se instaló una dinamo de corriente continua de 15 caballos para alimentar las excitatrices, para el alumbrado y para el manejo de los interruptores.

Los voltajes que con más frecuencia se emplearon durante los ensayos fueron 6.000, 12.000, 15.000, 18.000 y 20.000 voltios, y algunas veces también 3.000, 5.000 y 7.500, cuya

(1) Extracto de la Memoria escrita por Mr. R. Dahlander sobre *Tracción eléctrica en los ferrocarriles suecos del Estado*.

regulación ofrecía no pocas dificultades, porque en muchas ocasiones la carga pasaba bruscamente de cero á su valor máximo, y el factor de carga de 1 á 0,25, las cuales se intentó corregir con reguladores, empleándose al principio un tipo de éstos fundado en el mismo principio que el de Tirrell, pero cuyos resultados no fueron completamente satisfactorios por lo que se refiere á los contactos, razón por la cual se ensayaron varios materiales entre los cuales resultó ser el acero duro el más conveniente, aunque se había de renovar cada setenta horas.

En el cuadro de la Central, además de los interruptores necesarios, se colocaron un voltímetro, un amperímetro, un contador y los transformadores de corriente y voltaje indispensables. En los coches se instalarán indicadores de velocidad, y aparatos análogos en la Central, en forma tal, que se pudieran observar con facilidad por cualquier personal. Con todos ellos se hicieron gran número de ensayos, tomando lecturas cada diez segundos al principio y cada cinco posteriormente, de cuyos resultados parece deducirse que los errores de observación tienen muy poca influencia. Este procedimiento tenía el inconveniente de que exigía mucho tiempo, razón por la cual se recurrió al empleo de aparatos registradores, pero desechándolos del tipo corriente, por los errores debidos al rozamiento de la pluma sobre el papel, y adoptando el modelo reciente de Mr. Siemens Schuchertwerke, en el cual las lecturas se marcan con la chispa que produce un aparato de inducción, obteniéndose resultados muy satisfactorios. Los indicadores de velocidad estaban constituidos por dinamas pequeños con inductores formados por imanes permanentes de acero y cuya corriente pasaba por un voltímetro; su funcionamiento fué muy defectuoso al principio, pero se normalizó por completo cuando las escobillas de carbón se sustituyeron por otras de cobre. Se ensayaron, además, otros indicadores de velocidad para comparar unos con otros.

Línea de trabajo.

La línea de Tomteboda á Vartan, cuya longitud es 5.600 metros, se instaló, en primer lugar, con arreglo á los métodos corrientes en los sistemas de tracción monofásica, especialmente según los adoptados en el ferrocarril de Veltellina y en las líneas experimentales de Sprindlersfeld y Oerlikon. En vista de los resultados obtenidos se resolvió establecer diferentes modos de suspensión para el hilo de trabajo, la directa y la simple y doble catenaria. Dicho hilo tenía 8 mm. de diámetro, su altura por encima de los carriles oscilaba entre 5,20 y 6 metros, siendo 4,25 en los pasos inferiores; la desviación máxima con relación al eje de la vía fué 0,50 metros.

Durante la instalación de la línea de Vartan y durante los ensayos se adquirieron muchos datos y conocimientos que se utilizaron en la otra línea. Para que los puntos de suspensión del hilo de trabajo estuvieran perfectamente alineados, los postes tenían brazos móviles, á los cuales se fijaba con tirantes horizontales aquel hilo, disposición muy ventajosa por muchos conceptos, puesto que permitía regular la tensión del hilo de trabajo después de colocado, y los daños que producía su rotura eran de muy poca importancia. En la Memoria original se describen con profusión de detalles las disposiciones adoptadas definitivamente, así como las modificaciones introducidas después de los ensayos. También se hicieron multitud de experimentos con di-

ferentes tipos de aisladores y con varios de los cementos que se emplean para enlazar éstos con sus soportes de hierro. Por regla general, se emplearon postes de madera y, en algunos casos, metálicos, pero éstos tenían el inconveniente de exigir fundaciones de cierta importancia. Tanto en los cruces con otras vías de comunicación, como en los puentes, se instalaron aparatos de seguridad. En el hilo de trabajo se colocaron varios interruptores para dividir la línea en secciones independientes si esto se consideraba necesario.

Material móvil.

Los ensayos se hicieron con dos locomotoras eléctricas, que remolcaban trenes ordinarios, y con dos coches automotores, á los que se enganchaban dos coches, formando así un tren de cuatro unidades; cada uno de los automotores dispone de dos motores de 115 caballos, montados sobre un carretón especial, de un freno de mano y de otro de aire comprimido, de dos troles, uno en cada extremo del vehículo, los cuales se sustituyeron posteriormente por dos armaduras del tipo Oerlikon.

Las locomotoras fueron construidas por las casas Siemens Schuckertwerke y British Westinghouse Co., con motores que, lo mismo que los de los automotores, habían de trabajar con voltajes de 20.000 voltios.

Para tener idea de la energía consumida por tren era preciso evaluar las pérdidas, las cuales en ningún caso pasaron del 5 por 100; la caída de voltaje fué siempre inferior al 2 por 100; sin embargo, no se hizo corrección alguna por este motivo al calcular la energía, porque los demás elementos no se podían determinar con tal aproximación que un error del 2 por 100 influyera sensiblemente en el resultado final, sobre todo cuando el voltaje llegaba á 12.000 voltios. El error debido á la caída del voltaje era solamente $\frac{1}{4}$ del indicado antes y era inversamente proporcional al voltaje.

Las locomotoras disponían de indicadores especiales para medir la velocidad del tren, anotándose sus indicaciones cada diez segundos en un principio y cada cinco posteriormente. Al multiplicar el resultado medio obtenido por el tiempo, la longitud calculada era menor que la efectiva, discrepancia que desapareció cuando se hicieron independientes el eje de los frenos y el del indicador.

El esfuerzo de tracción de las locomotoras y automotores se determinó con un dinamómetro de resorte colocado entre éstos y el primer vehículo, haciéndose unas 100 lecturas, con varias composiciones de trenes, en curvas, etc.

Conclusiones.

En primer lugar, por lo que se refiere á la Central, hay que hacer constar que su funcionamiento no debe considerarse como parte integrante de los ensayos, porque dicha Central constituye únicamente el medio para alimentar con energía la línea. Además trabajó en condiciones muy desfavorables, tanto por la pequeña importancia de la instalación, como porque las alteraciones de la carga y las irregularidades del voltaje son mucho mayores cuando circulan pocos trenes que cuando circulan muchos.

De los ensayos se ha deducido que se pueden emplear altos voltajes en el hilo de trabajo sin inconveniente alguno, y sin peligro para viajeros y empleados cuando se instalan convenientemente ciertos aparatos de seguridad. Los troles no ofrecieron dificultades, puesto que la corriente que

reciben se reduce á medida que el voltaje es mayor. Los aisladores con que se hicieron los ensayos también dieron excelentes resultados. Se estudiaron multitud de detalles, que se perfeccionaron en vista de lo que la experiencia aconsejaba. El procedimiento para suspender el hilo de trabajo y los alimentadores fué objeto de una atención muy detenida, llegando á una solución muy satisfactoria. Para uniformar la flecha y la tensión de los conductores y para evitar las roturas y gastos inherentes con los sistemas corrientes, se ideó uno fundado en el empleo de pesos tensores que dió excelentes resultados. La velocidad de los trenes rara vez excedió de 55 ó 60 kilómetros por hora.

Los ensayos y medidas que se hicieron sobre el empleo de los carriles para cerrar el circuito demostraron que la resistencia eléctrica de la vía era mucho más pequeña que lo que se había supuesto, circunstancia debida á que la mayor parte de la corriente retroceda por tierra, á consecuencia de lo cual la conductibilidad de las juntas de carriles no tiene tanta importancia como en las líneas de corriente continua. Basta enlazar eléctricamente con los carriles todos los elementos metálicos inmediatos á la vía para que no haya peligro alguno por la existencia de diferencias de potencial muy elevadas, las cuales únicamente producirán perturbaciones en las líneas telegráficas y telefónicas vecinas. Son tan grandes las ventajas que ofrece la utilización de los carriles como circuito de vuelta, en relación con sus inconvenientes, que se acepta sin vacilación alguna.

Se verificaron también muchos ensayos para estudiar los efectos de la corriente del hilo de trabajo sobre las líneas telegráficas y telefónicas, aplicando diversos procedimientos para disminuir las perturbaciones observadas y obteniendo resultados más ó menos satisfactorios. En relación con estos hechos se estableció una teoría completa, gracias á la cual se pudieron generalizar los resultados obtenidos y deducir consecuencias sobre las perturbaciones citadas y sobre los procedimientos para anularlas. Respecto de este particular todavía hay mucho que aprender; pero puede afirmarse desde luego que el coste que representan las instalaciones para evitar dichas perturbaciones tiene una influencia muy pequeña en el resultado financiero de la línea.

Por lo que se refiere á los motores, parece deducirse de los ensayos que el monofásico casi conmutador reúne hoy día condiciones tales que satisface todas las exigencias de un buen motor para tracción en lo que hace á seguridad, rendimiento y regulación, siendo muy pequeñas las dificultades que ofrece el conmutador, así como sus gastos por conservación y reparación. Desde la época en que se hicieron los ensayos se han perfeccionado mucho los motores monofásicos, existiendo muy poca diferencia entre sus pesos y los correspondientes á los de corriente continua de la misma potencia. Tanto el motor serie compensado como el de repulsión compensado dieron muy buenos resultados en los ensayos; sin que se manifestara diferencia alguna en favor de uno ú otro, habiéndose reducido tanto los inconvenientes de ambos por medio de disposiciones muy ingeniosas, que no es preciso tenerlos en cuenta. También se pusieron en práctica diversos sistemas para enfriar los motores con aire comprimido, con resultados muy satisfactorios, siéndolo también los que se obtuvieron con los procedimientos para regular los motores y para tomar la corriente.

Hay que observar que todos los ensayos, salvo ligeras excepciones, se hicieron con la frecuencia para que se habían construido los motores, es decir, 25.

Es verdad que las turbinas estaban construídas para obtener también las frecuencias 20 y 15, pero como con éstas disminuía la potencia de generadores y motores, los ensayos hechos en estas condiciones tenían muy poco valor, circunstancia que, después de todo, es de poca importancia, porque sin su ayuda se puede resolver la cuestión. Es evidente que la frecuencia que conviene emplear ha de estar comprendida entre 15 y 25; las inferiores á la primera exigen generadores y transformadores muy voluminosos, pero es favorable con relación á los motores series compensadas de gran potencia, especialmente si no tienen polos auxiliares, circunstancias que no se aplican al motor de repulsión compensado; con frecuencias pequeñas, tanto en uno como en otro motor, las ruedas tienen tendencia á patinar y se dificulta la utilización del peso adherente. En resumen, los inconvenientes de la frecuencia 25 se compensan tanto con sus ventajas, que sin vacilación alguna debe aceptarse.

En resumen, el problema de la tracción eléctrica en los ferrocarriles suecos del Estado, teniendo en cuenta los progresos de estos últimos años, se puede considerar resuelto desde el punto de vista técnico; es natural que continuamente se estarán perfeccionando los detalles, pero puede afirmarse, sin género alguno de duda, que difícilmente se ideará otro sistema más sencillo, más barato y más perfecto que el monofásico.

Ω.

LAS GRANDES CENTRALES DE VAPOR

DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LAS CONDICIONES GENERALES DE SU ESTABLECIMIENTO

(Notas de M. G. Chervier. — Bulletin de la Société des Ingenieurs civils de France.)

Primera parte.

Existe, en la generación de la energía eléctrica por las grandes fábricas centrales, un factor que, más que ninguno otro, da á esta industria un carácter propio; dicho factor la define y la domina y sobre ella carga todo el peso de las dificultades y de las responsabilidades que él engendra. Este factor es el carácter instantáneo de la producción, regida de un modo inmediato por la demanda exterior, sin que ninguna reserva de energía pueda atender á una falta, aun de muy poca duración, porque las condiciones en las cuales se efectúa actualmente esta generación de energía excluye toda posibilidad de recurrir al manantial oneroso, y sobre todo restringido, del acumulador eléctrico.

Dos clases de sujeción resultan de este estado de cosas: de una parte, la obligación de mantener una constancia lo más completa posible en la marcha normal, y de otra parte, el eliminar toda posibilidad de parada accidental. Ambas condiciones son igualmente imperiosas pero muy desigualmente fáciles de realizar. Porque si es cierto que es bastante fácil, adoptando convenientes disposiciones y una buena vigilancia, sostener la potencia generadora constantemente al nivel de la potencia pedida por la red, evitando los golpes bruscos, que se traducen por fuertes variaciones de voltaje, también es cierto que es completamente imposible, cualesquiera que sean las medidas preventivas que se tomen y la atención que se preste á la marcha, el garantizar ente-