

LA ELECTRICIDAD COMO FUERZA MOTRIZ EN LOS CAMINOS DE HIERRO

POR EL BARON ROMAN GOSTKOWSKI

DIRECTOR DE SECCION DE LA DIRECCION DE LOS CAMINOS DE HIERRO
DEL ESTADO EN AUSTRIA

(Conclusion.)

Suponiendo que se emplean para cargar los acumuladores máquinas como las que Brush construye para la iluminacion eléctrica, que tienen 2.000 volts. de tension y una resistencia de 22,4 ohms, se puede determinar como sigue el número de ellas necesario para cargar los acumuladores.

Representando por x este número, la resistencia total del circuito del que forman parte n acumuladores es

$$R = 22,4 x + \frac{n}{1.200} \text{ ohms,}$$

siendo, como se ha dicho, $\frac{1}{1.200}$ ohms, la resistencia de cada elemento y combinándolas en série.

Considerando, pues, que

$$E = 2.000 . x \text{ volts.},$$

$$q = 10.3600 = 36,10^3 \text{ segundos,}$$

$$2 = 10^6 \text{ coulombs,}$$

$$n = 9.126 \text{ aparatos,}$$

$$e = 2,15 \text{ volts.},$$

se deduce sustituyendo estos valores en la ecuacion anterior $x = 15$, esto es, que 15 máquinas Brush han de estar trabajando durante 10 horas para cargar los acumuladores necesarios para una locomotora eléctrica.

Teniendo en cuenta el concurso de trabajo mecánico necesario para hacer funcionar durante este tiempo las 15 máquinas, y dividiendo por él el trabajo producido, 300 caballos durante 15 horas, se obtendrá el efecto útil, que no pasa del 40 por 100; es decir, que con igual empleo de combustible solamente puede desarrollarse por medio de la electricidad 40 por 100 del trabajo que se engendraria haciendo actuar directamente el vapor.

Este resultado no es á la verdad nada favorable, y aún lo sería menos si se considerara el costo de adquisicion de una locomotora eléctrica de esta clase, que es muy elevado, porque siendo en la actualidad 80 francos el precio de un acumulador, tan sólo el total de los 9.126 elementos necesarios ascenderia á 730.080 francos, mientras que una locomotora de vapor equivalente cuesta 60.000 francos, esto es, menos de $\frac{1}{10}$ de aquella cantidad.

Sin embargo, estos resultados podrían en ciertos casos no ser tan desfavorables como á primera vista aparecen, si en determinadas circunstancias fuese factible disminuir los gastos del empleo de la electricidad comparados con los que origina el uso del vapor. En efecto; en el primer caso es posible establecer máquinas fijas, que consumen aproximadamente la tercera parte del combustible que las locomotoras para igualdad de fuerza, y cuyo servicio es tambien más barato, y aún otras veces puede reemplazarse la fuerza del vapor por las notablemente más económicas del agua ó del viento.

Otra circunstancia importante existe en contra del uso de los acumuladores, y es su gran peso, que no permite un racional empleo de la fuerza; en efecto, los elementos que cada vez tiene que llevar la máquina pesan $\frac{3.042 \times 25}{1.000} = 76$ toneladas; asignando $\frac{1}{3}$ de este peso como tara al wagon que los lleva, la locomotora eléctrica pesa $76 + \frac{1}{3} 76 = 100$ toneladas, mientras que una de vapor equivalente con su ténder apenas llega á 60.

Del siguiente modo puede verse de qué manera influye el peso del motor en la explotación; si se representa por ω kgrs., la resistencia por tonelada en un camino de hierro y la máquina con los wagones pesa Q toneladas, la resistencia total que tiene que vencer la locomotora es

$$\omega Q \text{ kgrs.} = T.$$

Sea M el peso de la máquina y W el de los wagones; se tiene

$$Q = M + W,$$

de donde

$$W = \frac{T}{\omega} - M.$$

La fuerza de tracción de una locomotora de 300 caballos, con una velocidad de marcha de 36 kilómetros por hora (10 minutos por segundo), es

$$T = \frac{300 \times 75}{10} = 2.250 \text{ kgrs.};$$

se puede poner, pues, la igualdad

$$W = \frac{2.250}{\omega} - M.$$

Considerando además que si se designa por m la pendiente del camino en milímetros por metro de longitud de vía, por R el radio de las curvas en metros y por v la velocidad de marcha en metros por segundo, puede representarse la resistencia total por medio de la fórmula

$$\omega = \left(4 + m + \frac{600}{R} + \frac{v^2}{50} \right)$$

de aquí se obtiene para curvas de 300^m de radio y velocidad de 10ⁿ por segundo

$$\omega = (8 + m) \text{ kgrs.}$$

por lo tanto,

$$W = \left[\frac{2.250}{8 + m} - M \right] \text{ toneladas;}$$

pero anteriormente se dijo que si se emplea el vapor $M = 60$ y si la electricidad $M = 100$; de manera que sustituyendo estos valores resulta

$$W_v = 60 \left[\frac{30 - m}{8 + m} \right]$$

$$W_e = 100 \left[\frac{15 - m}{8 + m} \right]$$

siendo W_v y W_e los pesos de los carruajes en toneladas en uno ú otro caso.

De estas fórmulas se deduce que mientras que la locomotora de vapor, con una velocidad de 36 kilómetros por hora, es capaz de desempeñar trabajo útil hasta una pendiente máxima de 30^{mm} por metro, la eléctrica alcanza su límite para la pendiente de 15^{mm} por metro, mitad ménos que la otra.

La relacion de las cargas útiles en ámbos sistemas es, pues,

$$\frac{W_v}{W_e} = \frac{5}{3} \cdot \frac{15 - m}{30 - m}$$

y expresando el valor de W_e en tanto por ciento de W_v , se obtiene, designándolo por a

$$a = 166 \frac{15 - m}{30 - m}$$

De esta igualdad se deduce que para

$$\begin{array}{cccc} m = & 0 & 5 & 10 & 15 \\ a = & 83 & 66 & 41 & 0 \end{array}$$

Estos números demuestran que en un camino horizontal, la carga útil empleando la electricidad llega como límite al 83 por 100 de lo que se obtendría haciendo uso del vapor, y que para una pendiente de 0^m,01 por metro descende este límite al 41 por 100. Tal vez pudiera, pues, ser conveniente servirse de los acumuladores en un camino horizontal, pero no ya en cuanto éste presente algunas pendientes.

Se ve, por consecuencia, que el peso de los acumuladores es una causa muy importante que excluye su empleo en los ferro-carriles; solamente podrá hacerse uso de ellos cuando se construyan más ligeros que en la actualidad.

Un progreso en este sentido acusan los elementos que E. Böttcher cons-

truye en Leipzig desde principios de 1883, puesto que en igualdad de capacidad, no solamente son mucho ménos pesados, sino tambien notablemente más baratos que los de Faure, lo que depende de que para uno de los electrodos, en vez de emplear el plomo, usa el zinc, metal más ligero y barato.

A causa de las dificultades con que se tropieza, segun acaba de verse al querer emplear los acumuladores, se pensó evitarlas haciendo pasar la misma corriente que hubiera servido para cargar aquellos aparatos directamente á un electromotor colocado en la locomotora.

La máquina que produce la corriente ó generador es, pues, fija, mientras que aquella á que se dirige ó receptor puede cambiar del lugar, estando enlazadas sus partes movibles con las ruedas del vehículo que la lleva. Desde el momento en que circula una corriente, adquiere aquél un movimiento progresivo, en tanto que la máquina fija no cambia de lugar; por consecuencia, la distancia entre ambas varía; así es que el conductor de la corriente del generador al receptor debe estar establecido de un modo conveniente.

En un principio Siemens, que fué el primero que construyó un ferrocarril de esta clase en el año 1879, en la Exposicion industrial de Berlin hizo uso de los carriles, sobre los que rodaba el carruaje con el receptor para conducir la corriente, y la disposicion era tal, que ésta venía del generador por un carril hasta la rueda del carruaje en relacion con el receptor; continuaba por el eje de aquélla, que estaba dividido en su medio por una pieza aisladora; recorría los alambres de la máquina, y por la otra parte del eje la rueda correspondiente, y el segundo carril volvía al generador, quedando cerrado el circuito. Un ferrocarril de esta clase se halla en explotacion desde 1880 entre Berlin y la Academia de Cadetes de Lichterfelde; así como otro fué construido en Viena durante la Exposicion de electricidad de 1883.

Perjudicando á la seguridad del carruaje la direccion del eje en dos partes, se ideó emplear un conductor especial para transmitir la electricidad del generador al receptor, sin usar los carriles. Con este objeto, se estableció á lo largo del camino una série de tubos de pequeño diámetro, hendidos por su parte inferior y soportados por postes telegráficos, en el interior de los cuales se movía un piston, que por medio de un cable estaba enlazado de tal modo con el receptor, que el carruaje en su movimiento progresivo lo atraía. La electricidad recorría los tubos, pasando al receptor por el piston y el cable, y de aquí volvía al generador por los carriles. Un ferrocarril de este sistema fué construido en Paris durante la Exposicion de electricidad de 1881, y otro se encuentra en explotacion desde principios de 1884 entre Mödling y Brühl cerca de Viena.

Otra disposicion para conducir la electricidad se ha empleado en Portrush (Irlanda), colocando un tercer carril entre los otros dos por el cual viene la corriente del generador y pasa á la máquina por una rueda especial que se mueve sobre aquél; los otros carriles cierran el circuito.

No es posible señalar cuál de las tres disposiciones ha dado mejores resultados; sin embargo, es cierto que todas, aunque no perfectas actualmente, responden con suficiencia al objeto á que se las destina; así es que puede decirse que la conduccion de la corriente no es obstáculo alguno al empleo de las máquinas dinamo-eléctricas en el movimiento de los trenes.

Para comprender las dificultades que á ello se oponen, hay que hacer las consideraciones siguientes. El trabajo mecánico que es preciso emplear para que el generador produzca una corriente de i Ampère con la fuerza electromotriz de E Volts, es

$$\frac{i \cdot E}{g} \text{ kilogrametros;}$$

en la que g , segun se sabe, representa la aceleracion de la gravedad = 9,81.

El trabajo útil del receptor es del mismo modo

$$\frac{i \cdot e}{g} \text{ kilogrametros,}$$

expresando e en Volts la fuerza electromotriz del receptor.

El trabajo que el receptor devuelve es naturalmente más pequeño que el que el generador gasta, puesto que una parte de él se emplea en elevar la temperatura del circuito, parte que por consecuencia se pierde; esta pérdida asciende á

$$\frac{i}{g} (E - e) \text{ kilogrametros,}$$

ó representando por R la resistencia total del circuito $\frac{i^2 \cdot R}{g}$ kgrms.

Si se quiere emplear racionalmente el trabajo gastado hay, pues, que procurar reducir esta pérdida á un minimum; esto se consigue si se supone invariable la resistencia R , empleando corrientes lo más débiles posibles, es decir, haciendo i muy pequeña; pero como el producto de la intensidad de la corriente por la fuerza electromotriz debe ser constante, puesto que $\frac{i \cdot e}{g}$ es la expresion del trabajo útil, si i es muy pequeña, la fuerza electromotriz ha de ser muy grande, lo que supone un buen aislamiento de los alambres del receptor.

En general se eligen las magnitudes e é i de tal modo, que los gastos de explotacion sean lo más pequeños posible; estos gastos se componen

del costo de adquisicion del material, que comprende generador, conductor, receptor y máquina para mover el primero, así como de la cantidad que representa la fuerza perdida en el conductor. Haciendo un minimum esta suma, se obtendrá la disposicion más económica.

Se encuentra de este modo que la pérdida en la conduccion puede admitirse próximamente igual al 30 por 100 del trabajo que el receptor debe producir.

Este resultado, en union con las experiencias que se llevaron á cabo en París durante el año 1883 en los talleres del camino de hierro del Norte sobre trasmision eléctrica de la fuerza, conducen á la siguiente relacion:

$$\frac{e}{E} = a = 0,83.$$

De modo que si representa p el trabajo mecánico que desarrolla el receptor en kilogrametros por segundo, se tiene, segun ántes se dijo:

$$\frac{i^2 \cdot R}{g} = 0,3 \cdot p;$$

y considerando que

$$i = \frac{E - e}{R} \text{ y } \frac{e}{E} = 0,83,$$

se deduce finalmente

$$E = 10 \sqrt{p \cdot R}.$$

En esta fórmula queda aún que examinar el valor de la resistencia total R .

Segun Uppenborn, la disposicion más conveniente es aquella en que la resistencia interior del sistema llega á los $\frac{3}{7}$ de la exterior; así es que si se representa por r_1 la del generador, por r_2 la del receptor y por r_3 la de la conduccion, se debe tener que

$$r_1 = \frac{3}{7} (r_2 + r_3).$$

Eligiendo para receptor una máquina idéntica al generador r_1 , es igual á r_2 y en este caso

$$R = r_1 + r_2 + r_3 = \frac{5}{2} r_3$$

Si cada km. de conductor opone una resistencia de $\frac{1}{5}$ Ohms, dato su-

ministrado por la experiencia en esta clase de vías férreas, y es un kilómetro la distancia que separaba ambas máquinas, teniendo en cuenta la ida y vuelta de la corriente

$$r_s = \frac{1}{5} \times 2 = \frac{2}{5} \text{ Ohms,}$$

en cuyo caso

$$R = \frac{5}{2} \cdot \frac{2}{5} = 1 \text{ Ohms.}$$

Sustituyendo este número en el valor de E se tiene $E = 10 \sqrt{p \cdot 1}$, de cuya fórmula puede deducirse la magnitud de la fuerza electromotriz que el generador ha de desarrollar si es preciso obtener un trabajo de p kgrms. por segundo en un trozo de vía de un kilómetro de longitud.

En un camino eléctrico en el que el receptor deba efectuar tanto trabajo como una locomotora de vapor de 300 caballos en una línea férrea ordinaria, el valor de p es

$$p = 300 \times 75 = 15^2 \times 10^3 \text{ kilogrametros,}$$

y por tanto, el generador tiene que ser capaz de producir una fuerza electromotriz

$$E = 1.500 \sqrt{1} \text{ Volts.}$$

Se ve, pues, que para la explotación de un trozo de camino de hierro de 4 kilómetros tan sólo de longitud, se necesita una tensión de

$$1.500 \sqrt{4} = 3.000 \text{ Volts,}$$

tensión que legalmente casi no debe ser permitida.

Si se acepta que una tensión de 500 Volts sea el máximo admisible, puesto que corrientes de superior fuerza son peligrosas y además muy difíciles de aislar, se necesitarían en una línea de 4 kilómetros por lo menos

$$\frac{3.000}{500} = 6 \text{ generadores y otros tantos receptores; en total 12 máquinas}$$

eléctricas, lo que ciertamente no es económico.

Esta es la razón porque los caminos eléctricos construidos hasta el día, á más de ser de pequeño movimiento en comparación con los ferro-carri-les ordinarios, sus longitudes son extraordinariamente cortas, según puede verse en el siguiente cuadro:

NOMBRE DEL CAMINO.	Longitud en kilómts.	Pendiente máxima en milímetros por metro.	Velocidad de marcha en milímetros por segundo.	Intensidad de la corriente en Ampere.	Resisten- cia total en Ohms.	Fuerza electromo- triz del generador en Volts.
Möaling Brühl. .	1.5	15	5.5	40	0.7	350
Lichterfelde. . . .	7.0	—	5.5	—	—	90
Bēuthen.	0.8	—	4.0	37	1.6	1.000
Portrush.	10.0	25	3.1	—	1.5	500

Pero aún en una longitud de vía tan pequeña, presenta el empleo de la electricidad el inconveniente de que la máquina de vapor que mueve el generador verifica 100 revoluciones por minuto, mientras que este último llega á 1.600; y del mismo modo el movimiento del receptor, cuya velocidad es de 1.400 revoluciones por minuto, tiene que trasmitirse de tal manera á las ruedas de la locomotora ó carruaje eléctrico, que aquéllas den únicamente 200 vueltas.

Hay, pues, un aumento de velocidad del motor de vapor al generador en la relacion de 1 : 16 y una disminucion de la misma del receptor á las ruedas del carruaje en la relacion de 1 : 7; lo que se comprende aumente las dificultades de construccion.

Considerando todo lo expuesto, se llega necesariamente á la conclusion que, por una parte el peso de los acumuladores y por otra la dificultad de aislar los alambres de los electro-imanés en las máquinas dinamo-eléctricas, son las trabas que no permiten en la actualidad el empleo ventajoso de la electricidad como fuerza motriz en caminos de hierro de más importancia.

MEMORIA

SOBRE EL ESTADO Y PROGRESO DE LAS OBRAS DEL RÍO GUADALQUIVIR Y PUERTO DE SEVILLA DURANTE EL SEGUNDO SEMESTRE DEL AÑO ECONÓMICO DE 1883 Á 1884.

(Conclusion.)

RESÚMEN.

Para completar el importe de los gastos ocasionados en las obras durante el semestre que examinamos, deben agregarse á los de todos los ser-