

REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS

PUBLICACION TECNICA 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.

ELECTRIFICACIÓN DE LOS FERROCARRILES ESPAÑOLES

POR

D. LUIS SÁNCHEZ GUERVO

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

(CONTINUACIÓN) (1)

El problema técnico de la electrificación

I.—LA BATALLA DE LOS SISTEMAS.

Así se ha designado, gráficamente, la lucha entre los diferentes sistemas de tracción eléctrica en los ferrocarriles. Prácticamente, sólo quedan frente a frente dos adversarios: la corriente continua y la corriente monofásica, que actualmente constituyen los dos solos tipos a considerar en el problema que estudiamos.

La corriente trifásica se ha empleado en algunos casos particulares, y ofrece ciertas ventajas en líneas de montaña con perfil longitudinal sostenido (sin contrapendientes), para las cuales no se requiere la elasticidad ó amplio margen de velocidades, que es necesario cuando en aquel perfil se entremezclan tipos muy variados de rampas pendientes y horizontales. En estos últimos trazados conviene aprovechar íntegramente la potencia del tractor, marchando de prisa en los llanos y despacio las subidas, y a esto no se presta el motor de inducción trifásico, cuya velocidad es independiente, prácticamente, del par ó torque que desarrolla. En aquellas líneas (por ejemplo las de acceso á una divisoria), el motor trifásico presenta también alguna ventaja al constituir un freno automático moderador en las bajadas (2) y permitir, sin complicación alguna en el equipo eléctrico, la recuperación de energía en los trenes descendentes. En España tenemos una instalación de este género en el pequeño ramal de Santa Fe á las minas de Gergal (Almería) de la Compañía de ferrocarriles del Sur. En Europa hay algunas bastante importantes (entre ellas las del Simplón) y proporcionalmente muy pocas en América del Norte.

La necesidad del doble conductor aéreo es una complicación seria para el sistema alimentador. Por eso se ha ideado en América lo que se designa por *Split-phase system*, que, esencialmente, consiste en emplear motores de inducción con características similares á los trifásicos, pero alimentados por corriente monofásica desde un solo conductor aéreo, mientras la locomotora lleva un grupo auxiliar (*phase converter*), que genera la fase adicional

que requiere los motores (1). Ingenieros muy peritos asignan un gran porvenir á este sistema, considerándolo como preferente al monofásico. En opinión nuestra, uno y otro de estos dos sistemas son prácticamente equivalentes en un estudio de conjunto. Nuestra comparación versará, pues, sobre la corriente alterna y la continua.

Imaginemos que por Real decreto se ordenara acatar la afirmación de que el sistema monofásico es el sistema por excelencia y que, por consiguiente, todo ferrocarril que deseara cambiar su sistema de tracción, debe forzosamente usarlo. Tales circunstancias no están lejos de ser las que reinan en Alemania, donde ni siquiera se acepta la discusión ó la duda. Estas ideas han transcendido de tal modo, sin suficiente examen crítico, á una gran parte de los Ingenieros europeos, que á compatriotas nuestros hemos oído afirmar rotundamente ser la corriente monofásica la única solución, y, precisamente, á unos 15.000 voltios de tensión y 15 períodos de frecuencia.

El resultado de tal estado de cosas pudiera ser el que una gran suma de talento y laboriosidad se enfoque ó concentre sobre determinado fin, estimulando el progreso en cierta dirección escogida *a priori*. Además, los clientes—Sociedades ferrocarrileras—se encontrarían relevados de toda preocupación respecto á seleccionar el sistema adecuado. No cabría escoger, sino tomar lo que hay (lo único que las fábricas de material eléctrico manufacturan) ó dejarlo. Bajo semejantes condiciones, el campo de la investigación de las posibles mejoras quedaría tan limitado que cualquier dificultad constitutiva inherente al sistema único adoptado, vendría á formar un muro infranqueable para el progreso. Si existieran esas dificultades inherentes á un determinado sistema, la persistencia en su adopción significaría más bien un freno que una ayuda para el progreso permanente ó global del arte de la ingeniería. Si hay dos ó más sistemas cuya beligerancia es reconocida y que se dividen el campo, ningún mal resulta de la amplia y sostenida discusión ó disputa entre ellos, y cerrar los ojos para todos menos para uno, puede acarrear consecuencias desgraciadas. Bien considerada, la batalla de los sistemas es solamente un fantasma, una creación de la fantasía, pues en realidad se trata, no de adoptar ó rechazar un sistema, sino de escoger los aparatos y maquinaria que mejor satisfacen las condiciones del servicio en cada caso particular.

Trataremos de resumir con toda imparcialidad los argumentos que cada uno de los sistemas en lucha alega en favor suyo.

(1) Véase el número anterior.

(2) Para velocidad superior á la de sincronismo, el motor se convierte en generador, tomando de la línea su corriente magnetizante.

(1) A. I. E. E. Proceedings 1911.—Induction Machines for Heavy Single-Phase Motor Service.

La corriente monofásica proclama, con razón, como eje radical de sus reivindicaciones la posibilidad del empleo de altas tensiones. Innecesario es poner de relieve la importancia de tal alegato ante quien cultive la técnica de la electricidad. La distancia de transporte económico de la energía eléctrica crece con el cuadrado de la tensión, á igualdad de pérdidas en el sistema transmisor ó igualdad de coste de sus líneas. Sin altas tensiones, imposible transmitir y distribuir energía á distancias del orden de la que supone la electrificación de ferrocarriles. Aunque fuera económicamente aceptable una tensión relativamente baja al electrificar una determinada sección de un ferrocarril, el empleo de una tensión elevada proporcionaría amplio margen para extensiones sucesivas sin tocar ó cambiar nada de lo existente.

Aquí acaban esencialmente ó á esto se limitan y á sus inmediatas consecuencias, las reivindicaciones legítimas de la corriente monofásica aplicada á la tracción, y preciso es reconocer que su peso es grande. Sin las altas tensiones que permite el empleo de la corriente alterna, no hubiera nunca llegado la energía á lograr un radio económico de transporte que es prácticamente ilimitado. La energía de los saltos de agua seguiría casi totalmente disipándose en espumosas cascadas.

Pero prestemos la atención que merecen á otros factores del problema. Primeramente, en cuanto al transporte de energía se refiere, hasta ponerla ó entregarla junto á la vía ferrea, ninguna incompatibilidad hay entre el empleo de corriente alterna de alta tensión y la utilización de corriente continua para alimentar las locomotoras. La conversión de una clase de corriente en otra se hará en las subestaciones convertidoras ó transformadoras situadas á lo largo del trazado. Hay, pues, posibilidad—y desde luego conveniencia—en el empleo de corriente alterna desde la fuente productora de energía (salto de agua ó central térmica), hasta los aledaños del ferrocarril. Es más; para ese transporte puede usarse corriente trifásica y no monofásica, con la consiguiente economía de cobre. Todavía más; la red de alimentación con corriente continua no introduce decalaje alguno que acompañe á la importante carga ó consumo del ferrocarril; las subestaciones convertidoras de corriente alterna en continua, ya se empleen conmutatrices ó ya se instalen grupos convertidores formados por motor síncrono y generatriz de corriente continua, permiten, sin ulterior gasto de instalación y explotación, corregir el bajo factor de potencia ($\cos \Phi$) de la red de distribución de la central que alimenta otros servicios, factor que influencia, como es sabido, en razón inversa del cuadrado de su valor, el gasto de cobre á igualdad de pérdida en los transportes, ó la pérdida porcentual á igual gasto de cobre, siempre para una potencia determinada á transportar.

Entremos en las subestaciones convertidoras. El número de ellas puede ser menor—*ceteris partibus*—con la corriente alterna que con la continua, en razón de la menor tensión de la distribución en la línea de trabajo ó de alimentación de ferrocarril. Los gastos de instalación de estas subestaciones serán también menores con la corriente alterna que con la continua, ya que en el primer caso no requieren sino transformadores estáticos, mientras que en el segundo necesitan máquinas rotatorias. Por este motivo serán mayores los gastos de explotación en el caso de corriente continua (necesidad de personal, engrases, etc.) y algo más bajo el rendimiento de la subestación.

Todo ello coloca en una situación de relativa inferioridad—en cuanto á las subestaciones—á la corriente continua. Pero veremos en seguida que en la atenuación de esta inferioridad se han dado muchos y eficaces pasos. De un lado la tensión de servicio del ferrocarril con corriente continua, ha ido constantemente creciendo hasta ser ya normal la de 2.400 voltios y casi la de 3.000

voltios. Además, téngase en cuenta lo antes dicho respecto al $\cos \Phi$, igual á la unidad de la carga propia del ferrocarril, lo que lleva consigo rendimientos sensiblemente mejorados con relación á un bajo factor de potencia. Añádase que se ha llegado en Norte-América á construir y explotar subestaciones convertidoras que llaman «automáticas», en las que apenas se requiere la presencia del hombre, y desde luego no exigen más que el acto, de presencia de un empleado, como también lo requieren (aunque sólo fuera para prevenir robos ó atentados de la malevolencia) las subestaciones con transformadores estáticos. Todo esto) que luego recapitularemos, expresándolo en cifras, en cuanto es posible, atenúa no poco una inferioridad inicial indiscutible hace algunos años, en lo que afecta á las subestaciones cuando se emplea corriente continua.

Si seguimos camino adelante y de las subestaciones pasamos á la línea de trabajo, nos encontramos con que en ella residía la principal causa de limitación y de inferioridad para la corriente continua, al tiempo de ser inventado el motor monofásico de colector, tipos Winter-Eichberg ó Latour. Dos lustros hace, próximamente, se empezó á reconocer que la tensión de 500 ó 550 voltios no era ya adecuada, por lo baja, para desarrollar la aplicación de la tracción eléctrica en los ferrocarriles. Poco á poco, sin modificación ninguna de tipos y aparatos, se había elevado aquella tensión deservicio hasta 600 voltios, con la que funcionaban ya la mayoría de las explotaciones ferroviarias, siendo bastante ese ligero aumento para cubrir el crecimiento gradual del tráfico durante algunos años, con iguales pérdidas ó caídas de tensión en línea. Algunas, muy pocas, tentativas se llegó á hacer para alimentar á 700 y 800 voltios, pero repentinamente se dió el salto á 1.200 voltios, para lo cual todo estaba preparado. Debe notarse, en efecto, que tal salto no significó cambio alguno apreciable en el proyecto, en el género de construcción, ni en la explotación de los equipos eléctricos hasta entonces usado. Bastó dotar á los motores de un aislamiento suficiente para 1.200 voltios, pero cada uno de ellos siguió trabajando á 600, por grupos de dos en serie. Para los servicios auxiliares (compresor de aire para los frenos; circuitos de control; alumbrado del tren, etc.) se instaló en la locomotora un sencillo aparato llamado «dinomotor», que permitía seguir empleando en ellos la tensión de 600 voltios. La introducción de los polos auxiliares ó polos de conmutación en los motores de tracción, facilitó considerablemente la elevación de potencial sin perturbar el funcionamiento satisfactorio. La primera línea que adoptó la tensión de 1.200 voltios fué la *Pittsburg, Harmony Butler & New Castle Railway*, cuya explotación eléctrica empezó en 1907.

Desde entonces se han multiplicado los ferrocarriles que emplean esta alta tensión, con resultados en absoluto irreprochables, con explotación tan segura como se hacía y se hace á 600 voltios. De un documentado artículo publicado por I. A. Dewhurst (1) tomamos el siguiente resumen, que muestra el rápido desarrollo en Norte-América de la electrificación con corriente continua de alta tensión:

| AÑO | Número de ferrocarriles. | Número total de millas. |
|--------------|--------------------------|-------------------------|
| 1907..... | 1 | 41 |
| 1908..... | 2 | 134 |
| 1909..... | 0 | 0 |
| 1910..... | 6 | 424,6 |
| 1911..... | 2 | 201 |
| 1912..... | 3 | 196,5 |
| 1913..... | 14 | 967 |
| TOTALES..... | 28 | 1.964,1 |

(1) *General Electric Review*.—Noviembre 1913.

Una gran parte de los ferrocarriles incluidos en este resumen, son del tipo llamado interurbano, que como ya creemos haber dicho en otro lugar, es una creación yanqui que tiene pocos similares en Europa (1).

En 1912, es decir, cinco años después de ponerse en explotación la primera línea á 1.200 voltios, se dió el gran paso á 2.400 voltios, que ha sido el adoptado con éxito completo, para satisfacer las duras condiciones de tráfico pesado que existían en el BUTTE, ANARCONDA & PACIFIC RAILWAY, línea á la que ya hemos aludido en el capítulo primero de este trabajo.

También, no más tarde que en Octubre de 1915, hizo su viaje de ensayo la primera locomotora de corriente continua á 3.000 voltios, en las líneas de la CHICAGO, MILWANKEE & ST. PAUL RAILWAY COMPANY. Puede decirse que es el primer tipo de locomotora transcontinental, pues ninguna electrificación hasta entonces acometida afecta á un tráfico tan fuerte en tan extenso trazado (2). Las líneas comprenden 440 millas de trazado en el territorio llamado GREAT CONTINENTAL DIVIDE. Se estudia también extender la electrificación á la costa del Pacífico, lo cual elevaría la longitud de trazado electricado á unas 850 millas. La locomotora puede arrastrar un tren de mercancías de 2.500 toneladas (3), sobre rampa de 0,010 á 16 millas por hora (25,5 kilómetros-hora) ó un tren de viajeros de 800 toneladas sobre la misma rampa á 30 metros por hora (48 kilómetros), su peso propio es de 282 toneladas repartidas sobre ocho ejes, con una longitud total entre topes de 112 pies (34 metros), pero constituida en realidad por dos locomotoras articuladas como en las de vapor tipo Mallet. La potencia en trabajo continuo es de 3.000 caballos y posee medios de recuperar energía en las bajadas. Esta sucesiva elevación, que ligeramente hemos reseñado, de voltaje de la corriente continua aplicada á la tracción, ha llegado á satisfacer cumplidamente las más rigurosas exigencias, y claramente lo muestran las cifras del párrafo precedente.

Continuando nuestra comparación del sistema monofásico con el de corriente continua, en cuanto á la línea de trabajo propiamente dicha, debemos fijarnos en que las caídas de tensión por kilovatio y kilómetro —á igualdad de secciones y voltaje—son mucho más elevadas con la corriente alterna, debido á varias causas. La carga ó consumo de los trenes es, en dicho sistema, fuertemente inductiva y dicho queda que, en razón inversa del cuadrado del factor de potencia, varía la pérdida en línea. El mismo circuito alimentador presenta una autoinducción elevada, especialmente á causa de ser una mitad de aquél (los carriles) de material eminentemente magnético. Con la frecuencia de 50 períodos puede estimarse —*grosso modo*— que la caída de tensión en la línea aérea es 1,5 veces, y la caída de tensión en los carriles 6 veces mayor para la corriente alterna que para la continua. En el conjunto del circuito, el promedio puede cifrarse en 1,75 veces mayor en el primer caso que en el segundo.

Estas características disminuyen en medida muy apreciable las ventajas de la mayor tensión alterna y obligan a espaciar las subestaciones bastante menos de lo que pudiera pensarse por la sola consideración del voltaje. Contra ese molesto acompañamiento que va unido á la reactancia de la línea y al antipático cos ϕ de la carga, se lucha disminuyendo la frecuencia de la corriente alterna, frecuencia, que fué bajada á 25 períodos en los primeros ensayos y que en las instalaciones alemanas modernas hasta

ahora hechas (ejemplo, Dessau-Bitterfeld) se ha reducido á 15 períodos y aun menos.

Esta observación nos trae como de la mano á tratar un punto al que parece que no le dan importancia alguna los apologistas á ultranza de la corriente monofásica, y que, para quien esto escribe, la tiene enorme en el terreno práctico. En el capítulo I hemos llegado razonadamente á la conclusión de que, en general, será antieconómico para el ferrocarril construir y explotar su propia central. Pero no es fácil encontrar centrales que produzcan su corriente á 25 ó menos períodos (1). Si la central alimentadora hubiera de instalar para este fin grupos especiales de frecuencia reducida, desaparecen muchas de las ventajas de la producción en común. Pero aunque se encontrara una Empresa productora de energía á 25 ó 15 períodos que alimenta servicios generales y pueda fundir su carga con la que el ferrocarril aporte, es seguro que la corriente que aquélla produzca será trifásica y no monofásica, y no cometerá la tontería de aceptar el desequilibrar sus fases en la inaceptable medida que supone la alimentación del ferrocarril, aunque se dividiera éste en tres secciones alimentadas, respectivamente, por cada una de las fases. Si el ferrocarril necesita instalar en sus subestaciones grupos rotatorios convertidores de frecuencia ó de corriente trifásica en monofásica, cae por su pie casi todo lo que de sugestivo tiene el sistema monofásico.

Algo más más podemos y debemos decir, dentro todavía del capítulo comparativo de las líneas de trabajo en uno y otro caso. La línea de alimentación monofásica constituye una amenaza, justamente temida, para los circuitos telegráficos y telefónicos que á lo largo del ferrocarril van instalados. Ningún método eficaz económico, que nosotros sepamos, se ha descubierto hasta la fecha para remediarlo. Las soluciones eficaces han consistido en desviar dichas líneas, con todos los inconvenientes de gastos y de ulterior complicación en la vigilancia y en las reparaciones; ó bien en poner retorno metálico á los circuitos, ó finalmente, el empleo de transformadores de protección con elevado costo. La corriente continua no produce perturbación en los circuitos telefónicos, y en cuanto á la influencia en los telegráficos (á causa del retorno por tierra), se combate bien y muy económicamente. Digamos, para terminar con lo que afecta á la toma y conducción de la energía, que la corriente continua permite el empleo de baterías-tope ó acumuladores. La batería, funcionando á modo de volante eléctrico de inercia, consiente regularizar la potencia tomada de la central generadora, haciendo casi constante é igual á la media la ordenada de este consumo. Esta regularización se traduce en beneficios muy apreciables para la central: puede reducir la potencia de los grupos en ella instalados, ya que su capacidad no necesita proveer á los máximos ó picos del consumo; las perturbadoras variaciones de la tensión debidas á cambios bruscos y fuertes de la carga, quedan así eliminadas, y todo ello puede trascender, y prácticamente trasciende siempre, á una mayor baratura de la energía. También la batería viene á constituir una cierta reserva de urgencia en caso de averías en la central ó en el sistema de transmisión de la energía, reserva que puede alimentar el servicio más inaplazable ó urgente, tal como el de los ligeros trenes de viajeros.

El reputado Ingeniero A. H. Armstrong publicó en 1914 (2) un estudio comparativo, para un caso concreto de gran línea ferroviaria, entre el empleo de la corriente alterna y el de la

(1) En esta denominación cabría incluir las líneas de Bilbao á Algorta; Bilbao á Portugalete; Barcelona á Sarriá (en prolongación ahora á Tarrasa y Sabadell); Barcelona á Mataró; etc.

(2) El acontecimiento fué de gran resonancia en todo el país. Ingenieros, estudiantes y toda clase de gente, hasta 5.000 visitaron el interior de la locomotora en el primer viaje de pruebas.

(3) 1 tonelada = 907 kilogramos.

(1) En España no sabemos de ninguna, entre las dedicadas á servicio general de luz y motores. El Ferrocarril de EL IRATI (Pamplona) genera á 25 períodos para su propio consumo.

(2) *General Electric Review*, «The engineering Problem of Electrification».—Enero 1914.

corriente continua. El sistema alimentador para el primer caso está formado por:

a) Línea de transporte á alta tensión, trifásica, 60 períodos (1).

b) Subestación principal para transformar la corriente trifásica de tensión muy elevada, en corriente monofásica á la tensión requerida por el ferrocarril (15.000 voltios). En esta subestación principal se hallarán, pues, contenidos:

1. Transformadores reductores de la tensión trifásica.
2. Grupos convertidores de frecuencia (60 á 25 períodos), y corriente (de tri á monofásica).

3. Transformadores elevadores de la tensión monofásica.

c) Subestaciones secundarias de transformadores reductores de tensión.

d) Transformadores de protección á lo largo de la línea.

e) Conductor de alimentación y *feeder* de retorno.

El *feeder* de retorno y los transformadores de protección tienen por objeto evitar la perturbación en las líneas telegráficas y telefónicas que corren paralelamente al ferrocarril.

El esquema de alimentación en el caso del empleo de corriente continua, comprende:

a) Línea de transporte á alta tensión, trifásica, 60 períodos (2).

b) Subestaciones convertidoras de alterna trifásica en continua. Cada subestación incluye:

1. Transformadores reductores de tensión.

2. Grupos convertidores de corriente trifásica en continua á 2.400 voltios.

c) Conductor de trabajo y *feeder* positivo en paralelo con él.

Los rendimientos comparados de estos sistemas de distribución y alimentación, expresados en tanto por ciento, van resumidos en el cuadro siguiente:

| PARTE DEL SISTEMA | Corriente alterna (split-phase) á 15.000 voltios. | Corriente continua á 2.400 voltios. |
|--|---|-------------------------------------|
| Transformadores reductores..... | 97,5 | 96,5 |
| Grupos convertidores..... | 87 | 81 |
| Transformadores elevadores..... | 97,5 | » |
| Línea de transmisión á lo largo del ferrocarril..... | 96 | 96 |
| Transformadores de línea..... | 96 | » |
| Transformadores de protección..... | 96 | » |
| Conductor de trabajo, vía y <i>feeder</i> | 96 | 88 |
| RENDIMIENTO COMBINADO | 70,5 | 66 |

La corriente alterna, en cuanto al sistema de distribución, presenta, por tanto, una ventaja respecto á la continua, que puede cifrarse en 4,5 por 100 de mayor rendimiento al utilizar la energía tomada de la central generadora.

Pero, para terminar la comparación de ambos sistemas, nos queda todavía que hablar de los tractores ó locomotoras.

En el estudio comparativo antes citado de Mr. Armstrong, estudia este Ingeniero la aplicación de una y otra locomotora á un mismo perfil longitudinal, para igual velocidad, y con igual peso de tren.

Los pesos á que en aquel estudio se llega para una locomotora capaz de desarrollar de un modo continuo la potencia co-

rrespondiente á 32.000 libras de esfuerzo tractor (1) para una velocidad de 15 millas por hora (24 kilómetros), son los que se ponen de manifiesto en el cuadro siguiente:

| PARTE DEL EQUIPO | Split-phase. 15.000 voltios. | Corriente continua. 2.400 voltios. |
|--------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| | Libras. | Libras. |
| Cuatro motores..... | 44.000 | 44.000 |
| Aparatos de maniobra..... | 17.000 | 27.000 |
| Compresor de aire..... | 4.000 | 4.000 |
| Equipos de frenos de aire..... | 3.000 | 3.000 |
| Diversos..... | 2.000 | 2.000 |
| Convertidor de fase..... | 22.000 | » |
| Transformador..... | 18.000 | » |
| Trucks, ruedas, carrocería, etc..... | 160.000 | 120.000 |
| TOTALES..... | 270.000 | 200.000 |

El peso de la locomotora de corriente alterna resulta ser, por consiguiente, superior en 35 por 100 al de la corriente continua.

Estos pesos influyen en el número de toneladas-kilómetros de tara ó parasitarias que gravan el transporte de la carga neta. Pero también influye no poco en desfavorable sentido para la corriente alterna, el menor rendimiento de la locomotora correspondiente. Copiamos el cuadro comparativo de dichos rendimientos en tanto por ciento para la marcha en horizontal y para la marcha en la rampa máxima (*RULING GRADE*), para la cual el tractor desarrolla sensiblemente su máximo de potencia normal.

| | SPLIT-PHASE | | CORRIENTE CONTINUA | |
|--|-------------|-------------|--------------------|-------------|
| | R. máxima. | Horizontal. | R. máxima. | Horizontal. |
| Motores y transmisiones..... | 89,3 | 86 | 89,3 | 86 |
| Ventilador..... | 97,8 | 95,8 | 97,9 | 95,9 |
| Resistencias..... | 98,6 | 98 | 99,2 | 99,4 |
| Convertidor de fase..... | 96,3 | 94,7 | » | » |
| Transformador..... | 98 | 97 | » | » |
| Corrección por rodámenes.. | 98 | 98 | » | » |
| Rendimiento en peso..... | 95 | 97 | » | » |
| <i>Rendimiento combinado.....</i> | <i>75,7</i> | <i>70,5</i> | <i>86,6</i> | <i>82</i> |
| PROMEDIO DE RAMPA Y HORIZONTAL..... | 73,1 | 84,3 | | |

Debemos explicar el significado de los dos epígrafes últimos en la primera columna. Los motores de inducción de que está provista la locomotora de corriente alterna del tipo *Split-Phase* marchan sensiblemente en sincronismo relativo, y por consiguiente todas las ruedas de la misma locomotora deben tener muy aproximadamente el mismo diámetro, para que la carga se reparta por igual entre los diversos motores. Cuando se tornea un par de ruedas, hay que tornear todas las demás por igual. Esto no constituiría molestia sensible á no ser porque en la línea habrá varias locomotoras trabajando á veces unidas en un mismo tren con doble tracción (caso de Pajares). Todas las locomotoras deberán ser intercambiables y para evitar el tornear á todas las ruedas cuando las de una lo requieren, lo cual sería una grave molestia, se instalan resistencias que permiten distribuir á voluntad la carga á que cada motor trabaja dentro de ciertos límites. Estas resistencias absorben un 2 por 100 de la energía, como término medio; y á ello es debida la cifra enfrente figurada de 0,98.

En lo que se refiere al *rendimiento en peso*, es el valor compa-

(1) Esta línea queda fuera de lo que al ferrocarril pertenece de acuerdo con la hipótesis hecha en el capítulo I. La frecuencia de 60 períodos es la *standard* ó tipo en América para servicios generales de luz y motores, mientras que en Europa lo es la de 50.

(2) Esta línea trifásica correrá también á lo largo del ferrocarril, para alimentar las diferentes subestaciones bajo apartado b). Esta parte de la transmisión queda incluida en las propiedades del ferrocarril.

(1) Una libra = 0,454 kilogramos. Es necesario decir que la locomotora eléctrica se acomoda automáticamente al perfil, aumentando la velocidad cuando disminuye el esfuerzo de tracción y viceversa.

rado de una y otra locomotora. Por la diferencia de peso de una y otra locomotora, para un mismo peso bruto de tren, siendo iguales la potencia de una y otra, el peso del tren *remolcado* deberá ser menor con el tractor de corriente alterna que con el de continua. Esta inferioridad relativa se acentúa en la rampa máxima (doble tracción) y se atenúa en la marcha en horizontal, para la cual basta una locomotora.

Si ahora reunimos las cifras de rendimiento de los sistemas de alimentación y de las locomotoras, llegamos á los resultados finales siguientes:

| | Split-phase. | Corriente continua. |
|--|--------------|---------------------|
| Distribución..... | 70,5 | 66 |
| Locomotoras..... | 73,1 | 84,3 |
| RENDIMIENTO TOTAL (TANTO POR CIENTO). | 51,5 | 55,7 |

En esta parte técnica de nuestro estudio no debemos entrar en consideraciones económicas; pero diremos sólo que en un par de ocasiones en que hemos debido estudiar profesionalmente una y otra alternativa, no hemos encontrado economía alguna en el costo de primera instalación, que pesara de un modo sensible en pro de la corriente alterna. Además, resulta de las estadísticas de explotación que los gastos de conservación de un equipo eléctrico para corriente alterna monofásica, son, ampliamente, dobles de lo que requiere un equipo similar de corriente continua. Por lo que se refiere al examen técnico de uno y otro sistema, se está muy lejos de poder proclamar como indiscutible la ventaja de adoptar la corriente alterna en la electrificación de las líneas férreas de interés general.

Nos hemos detenido, quizá más de lo que el carácter de este trabajo requería, en exponer la llamada *batalla de los sistemas*, pero hemos juzgado prudente salir al paso de prejuicios que se extienden insensiblemente hasta adquirir la fuerza de verdades consagradas.

Añadiremos que ningún ferrocarril electrificado con corriente continua ha cambiado su sistema por el de corriente alterna. En cambio llevamos una lista que ya contiene nueve casos de ferrocarriles americanos que explotaron primero con corriente alterna y cambiaron ulteriormente tal sistema por el de corriente continua.

El autor de este trabajo no ha podido procurarse de fuente fidedigna los motivos que han existido para que el *Midi* francés (que instaló la tracción eléctrica monofásica en sus líneas del Bajo Pirineo tras detestados ensayos y de un concurso entre las primeras firmas europeas que construyan material eléctrico) haya suspendido por completo tal explotación poco después de iniciada.

Qué es lo que el porvenir nos reserva nadie podrá afirmarlo. El empleo del sistema de corriente alterna monofásica ó alguna variante de éste, tal como al presente lo concebimos, puede desarrollarse según cierta dirección tal que utilice lo que de indiscutible bueno tiene, al mismo tiempo que salte sobre los inconvenientes que ofrece.

También la corriente continua puede quizá dar pasos de importancia enorme (por ejemplo, con el desarrollo de los convertidores Copper Hewitt de vapor de mercurio). Si se acepta cotizar esperanzas, ningún límite puede ponerse á la imaginación de los partidarios de uno y otro sistema. Lo que para nosotros importa dejar sentado por lo pronto es que no hay entre uno y otro sistema disparidad tal, que líneas posibles de electrificar (técnica y económicamente) empleando uno de ellos no lo sea empleando el otro.

(Continuará.)

Resultados conseguidos en la explotación de los ferrocarriles eléctricos suizos.

por
A. GIVELET

Ingeniero E. S. E.

La pasada guerra, incitando solamente al desarrollo de las industrias francesas inmediatamente útiles á la defensa nacional, parece ser que rel-gó á un segundo término los problemas de la electrificación de los ferrocarriles, pero, debido á la crisis del carbón durante el invierno de 1917-18 se vió la necesidad de economizar el precioso combustible, en un país donde, por lo demás, la hulla negra puede ampliamente suplirse con su rival la blanca. Por otra parte, y como se verá en lo que sigue, siendo la electricidad el único medio posible de establecer ferrocarriles en ciertas regiones montañosas y para luchar contra la despoblación de los departamentos desheredados, lo que se presenta como uno de los problemas nacionales de mayor gravedad para el porvenir, resulta en extremo interesante examinar inmediatamente los resultados que Suiza ha conseguido en este género de ideas, con objeto de sacar de ello el mayor provecho posible.

En la Memoria que presenté en el Congreso general de Ingeniería civil y que ha sido extractada de la tesis presentada al Jurado de la *École des Hautes Études Sociales*, examiné en toda su generalidad el problema de los ferrocarriles de montaña, lo que me obligó á no dar más que indicaciones muy ligeras respecto á la parte eléctrica del asunto.

No me parece por consiguiente inútil volver á insistir sobre este tema, tanto más, cuanto que el estudio de los ferrocarriles eléctricos de Suiza (dada la extrema diversidad de los ferrocarriles de este país, donde se halla sobre las rampas más acentuadas, como sobre las líneas en horizontal, las representaciones más variadas de todos los sistemas), nos permite aproximaciones y comparaciones difícilmente de ser encontradas en otra parte.

Cuadro I.

| | RAMPA M Á X I M A | Gasto para la tracción y los talleres en francos. | Número total de toneladas - kilómetros, comprendido el peso del material móvil en francos. | Gasto por tonelada - kilómetro, en céntimos. |
|---|----------------------|---|--|--|
| I. — LÍNEAS DE SIMPLE ADHERENCIA. | | | | |
| a) <i>Electricidad.</i> | | | | |
| Montreux-Oberland bernés. | 60 por 1.000 | 247.527 | 19.515.881 | 1,2 |
| Gruyère..... | 50 — | 167.150 | 14.636.522 | 1,1 |
| Aigle Sâpey Diablerets.... | 60 — | 39.039 | 2.414.347 | 1,6 |
| b) <i>Vapor.</i> | | | | |
| Lausana-Echallens-Bercher | 40 — | 81.088 | 4.228.717 | 1,9 |
| Righi-Scalidegg..... | 50 — | 4.373 | 47.434 | 9,5 |
| Uetliberg..... | 70 — | 29.039 | 1.115.623 | 2,6 |
| II. — LÍNEAS MIXTAS (ADHERENCIA Y CERMALLERA). | | | | |
| a) <i>Electricidad.</i> | | | | |
| Oberland bernés (sin la Schynge Platte)..... | 120 — | 109.051 | 5.900.159 | 1,8 |
| b) <i>Vapor.</i> | | | | |
| Viège-Zermatt..... | 125 — | 75.544 | 1.746.503 | 4,3 |
| III. — LÍNEAS COMPLETAMENTE DE ADHERENCIA. | | | | |
| a) <i>Electricidad.</i> | | | | |
| Arth-Righi..... | 200 — | 20.498 | 218.547 | 9,0 |
| b) <i>Vapor.</i> | | | | |
| Vitznau Righi..... | 250 — | 51.881 | 275.461 | 18,7 |