

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.

FERROCARRIL ELECTRICO DEL VALLE BREMBANA

El ferrocarril eléctrico del *Valle Brembana* enlaza la ciudad de Bergamo (Alta Italia) con el pueblo de San Giovanni Bianco, distantes próximamente unos 30 kilómetros; este ferrocarril sigue el valle del río Brembo; uno de los más pintorescos de los Alpes Italianos. La facilidad de obtener energía hidroeléctrica hizo pensar desde luego en el empleo de la tracción eléctrica. La elección de sistema fué estudiada detenida y minuciosamente, y después del examen de los diversos sistemas se decidió aplicar la tracción por corriente alternativa simple.

Toda la instalación se confió á la Sociedad anónima Westinghouse, del Havre.

El programa general de la instalación fué el siguiente: la distancia entre Bergamo y San Giovanni Bianco es de 30 kilómetros. La diferencia de altitud entre las dos estaciones de término es de 153 metros.

Por un perfil muy accidentado se trataba de remolcar trenes de mercancías de 120 toneladas de peso, á la velocidad de 20 kilómetros por hora, y trenes de viajeros de 80 toneladas á la velocidad de 30 kilómetros por hora. Es de vía única, con una separación de 1^m,44 entre los carriles, que pesan 27 kilogramos por metro lineal. El radio mínimo de las curvas es de 150 metros. Una de las particularidades de la instalación es que la estación central se encuentra 1.000 metros más allá de San Giovanni, lo que hace menos cómoda la distribución de la energía á lo largo de la línea.

Discusión del sistema de tracción empleado.

Dos sistemas principales podían adoptarse para este ferrocarril, el uno sobre la base de corriente continua y el otro sobre la de corriente alternativa simple.

A. *Proyecto con corriente continua.*—En el proyecto con corriente continua, la estación generadora central constaba de tres alternadores trifásicos de 500 KVA, á 50 periodos y 500 vueltas por minuto; estos alternadores estaban directamente bobinados para 10.000 voltios y distribuían la energía por medio de una canalización á alta tensión compuesta por tres conductores de cobre de 4 mm. de diámetro. La línea lleva, además, un tercer carril á 600 voltios, que pesa 30 kilogramos por metro.

Para alimentar este tercer carril se establecieron dos subestaciones con batería de acumuladores, una en San Pellegrino y otra en Ponteranica. La composición de cada una de estas subestaciones consistía en una conmutatriz de 110 kilovatios, 50 periodos, con su transformador trifásico correspondiente y una batería de 320 elementos de 360 amperios-hora.

Los automotores estaban equipados con cuatro motores de 75 HP. El peso de estos automotores era aproximadamente de 31.000

kilogramos. La vuelta de la corriente se hacía por los carriles conectados eléctricamente.

B. *Proyecto con corriente alternativa simple.*—La corriente alternativa simple permitió un proyecto mucho más sencillo. La estación central se componía de tres alternadores monofásicos de 500 KVA á 25 periodos y 500 vueltas por minuto; estos alternadores estaban bobinados para 6.000 voltios y alimentaban directamente una línea de trole á alta tensión. Los furgones automotores llevaban, como en el sistema anterior, cuatro motores de 75 HP; debían recibir la energía á 6.000 voltios por medio del trole; se disponían autotransformadores que rebajaban la tensión á 250 voltios, que era la tensión de alimentación de los motores. El peso de estos furgones era de 35.000 kilogramos aproximadamente.

La vuelta de la corriente se hacía también por los carriles embreadados eléctricamente.

El proyecto con corriente continua tenía, como principal inconveniente, el exigir un tercer carril, lo que hubiera hecho necesario el tomar precauciones especiales en los pasos á nivel. Una comparación sucinta de los rendimientos y precios va á permitir darse cuenta de las ventajas manifiestas que proporcionaría el empleo de la corriente alternativa simple.

Entre las barras de distribución de la central y la llanta de las ruedas, el rendimiento medio de las diversas partes de la instalación es el siguiente:

	Corriente continua.	Corriente alterna.
	Tanto por 100.	Tanto por 100.
Línea de contacto.....	85	96
Subestación.....	86,5	"
Equipo con transformador.....	85	77,5
Rendimiento en globo.....	62,5	74,5

ó sea un rendimiento notablemente superior para la corriente alternativa monofásica.

Para el precio de primer establecimiento, los gastos inherentes á las diversas partes de la instalación se establecerían proporcionalmente como sigue:

	Tanto por 100.	Tanto por 100.
Estación central.....	12,8	14,5
Línea de contacto.....	58	51,5
Línea de transporte de fuerza.....	12,8	"
Subestaciones.....	23,5	"
Cinco equipos.....	18,5	84
	125,6	100

La economía realizada en los gastos de primer establecimiento es, pues, por lo menos de un 25 por 100.

La tracción por corriente alternativa simple se imponía, por lo tanto, y la instalación eléctrica del ferrocarril del *Valle Brembana* se realizó sobre los datos generales que antes se han expuesto.

Estación central.

Se habilitó un salto de 27 metros en el río Brembo, á 1.000 metros aguas arriba de la estación de San Giovanni Bianco. Tres grupos electrógenos se destinaron al servicio de tracción; cada uno de estos grupos constaba de una turbina Riva Monneret y C.^a, acoplada á un alternador Westinghouse de 500 KVA, 6 polos, 6.000 voltios, 25 períodos y 500 vueltas por minuto con inductores giratorios.

La excitación está asegurada por dos grupos electrógenos de corriente continua de 30 kilovatios, 110 voltios y 1.000 vueltas por minuto; uno de estos grupos es de reserva. La regulación del voltaje se hace por medio de un regulador automático de tensión que actúa sobre la excitación. La permanencia de una tensión prácticamente constante, cualesquiera que sean la carga y el factor de potencia, es, en efecto, una de las condiciones esenciales para el buen funcionamiento del sistema. Esta realización de un voltaje constante por medio de un regulador que obra sobre la excitación, hace impracticable todo sistema que consistiera en alimentar una ó varias secciones de la línea por las diferentes fases de un alternador bi ó trifásico. El empleo de alternadores monofásicos parece indispensable, hasta ahora, en instalaciones análogas.

El cuadro de distribución es del tipo con columnas con cableaje á alta tensión, dispuesto en los sótanos; los disyuntores é interruptores de aceite se manejan á distancia por medio de electro-ímanes alimentados por la corriente de excitación á 110 voltios.

Con el fin de hacer que el alumbrado de las estaciones sea completamente independiente del servicio de tracción, se ha dispuesto un pequeño alternador monofásico Westinghouse de 50 KVA, 25 períodos y 740 vueltas por minuto. Dicho alternador es de 25 períodos y 6.000 voltios para que eventualmente la corriente de los grupos de 500 KVA pueda servir también para el alumbrado.

El punto de arranque de las líneas está sobre una torre situada á uno de los lados del edificio; en los diferentes pisos de esta torre se han dispuesto los interruptores principales de las líneas y de los pararrayos. Cinco hilos parten de la estación central; dos hilos de 50 mm. para alimentar el hilo de contacto, otro de 50 mm. para el carril de vuelta de la corriente, y dos hilos de 12 mm. para el alumbrado.

Con cuatro trenes simultáneamente en servicio sobre la línea, con un peso total de unas 400 toneladas y el gasto medio de la estación central, osciló entre 200 y 1.000 KVA. El gasto máximo de 1.000 KVA sólo se necesitó durante treinta segundos.

Líneas eléctricas.

El sistema de suspensión de línea, empleado en el ferrocarril del *Valle Brembana*, fué el llamado de suspensión catenaria simple, sistema empleado por la Compañía Westinghouse en la mayor parte de sus instalaciones monofásicas de este género.

Á cielo abierto, el hilo del trole está suspendido de tres en tres metros por medio de péndolas planas de hierro á un cable portador de acero, compuesto de siete hilos de 2 mm. de diámetro cada uno. La altura del hilo de contacto por encima del plano de los carriles es de 6 metros.

Se han empleado varios tipos de soportes; normalmente la línea va montada sobre postes de madera inyectados con bicloruro de mercurio; estos postes llevan una consola lateral ó están ligados entre sí, dos á dos, por una barra transversal. Las consolas están formadas por dos hierros en canal de 60 mm. de altura y 5,2 kilogramos de peso por metro lineal; las barras trans-

versales están constituidas de la misma manera ó bien por piezas de madera.

En los puentes, los postes de madera han sido reemplazados por arcos metálicos; en las estaciones, á causa de la corta distancia entre las vías, ha sido preciso á veces suprimir los postes intermedios y colocar vigas transversales en celosía, cuya longitud alcanzó á veces 18 metros. La separación normal entre los soportes es de 35 metros, con una flecha para el cable portador de 30 centímetros, lo que corresponde á una tensión de 450 kilogramos á la temperatura de 0 grados. En las curvas, las separaciones se reducen de manera que la desviación del eje no sea superior á 50 centímetros como máximo. El cable portador va fijado á los soportes por medio de un sistema de aisladores Ginori, unidos á las barras transversales ó á las consolas; estos aisladores pueden resistir una tensión continua de 15.000 voltios, bajo una lluvia artificial y una tensión instantánea de 50.000 voltios.

En los túneles, el sistema de suspensión va montado sobre una armadura de hierro empotrada en la bóveda. Los puntos de suspensión del cable portador están distantes entre sí una longitud de 15,50 metros. El seccionamiento de las líneas puede realizarse por medio de postes, dispuestos en las principales estaciones sobre torres en celosía.

Locomotoras.

Tanto el servicio de mercancías como el de viajeros se realiza con cinco locomotoras eléctricas de dos carretones motores cada una. Estas locomotoras, cuya parte mecánica ha sido ejecutada en los talleres de la Sociedad Ernesto Breda, y la parte eléctrica por la Sociedad anónima Westinghouse, están equipadas con cuatro motores eléctricos de 75 caballos cada uno. Las locomotoras toman la energía eléctrica por medio de un trole pantógrafo que las permite marchar en los dos sentidos sin necesidad de ninguna maniobra especial. El patín de contacto, de aluminio, se aplica contra el hilo de la línea por medio de resortes metálicos dispuestos en la base del trole, en el interior de un cilindro metálico llamado cilindro principal. Admitiendo aire comprimido en el interior del cilindro, éste actúa contra los resortes metálicos y el trole desciende. Una disposición de cierre por aire comprimido permite fijarlo en esta posición y aislar completamente el coche de la línea.

El transformador montado sobre el carruaje es de un solo enrollamiento ó autotransformador; uno de los extremos del enrollamiento está conectado con los carriles y el otro extremo va conectado al trole. Este autotransformador se ventila artificialmente por medio de un pequeño ventilador eléctrico, alimentado por corriente monofásica á 100 voltios; al efecto se ha dispuesto una toma de corriente sobre el autotransformador.

Los motores eléctricos tienen una potencia normal de 75 HP con una velocidad de 700 vueltas por minuto; atacan los ejes de las ruedas por simple reducción de engranajes en la relación de 15/70.

El equipo de freno de la locomotora comprende un freno Westinghouse; el aire comprimido necesario para la maniobra de este aparato lo suministra un pequeño compresor de aire, movido por un motor monofásico á 100 voltios. El depósito principal de aire comprimido está colocado sobre el techo de la locomotora y los demás depósitos en el interior de la misma.

Las locomotoras van protegidas contra las descargas atmosféricas por un pararrayos tipo «Wurtz», colocado sobre la techumbre. Por último, sobre los enrollamientos del transformador se ha dispuesto un terminal á 500 voltios para el servicio de alumbrado y calefacción de los coches de viajeros.

Pruebas.

Una vez terminada la instalación se procedió á hacer pruebas contradictorias por la Sociedad del ferrocarril eléctrico del *Valle Brembana* y por la Sociedad anónima Westinghouse, para

determinar si se habían cumplido bien las condiciones del contrato.

Dichas pruebas se refirieron particularmente á los puntos siguientes:

- 1.º Funcionamiento de la línea á alta tensión.
- 2.º Conmutación de los motores.
- 3.º Condiciones de arranque y adherencia de las locomotoras.
- 4.º Rendimiento en globo de la instalación.

El funcionamiento de la línea á alta tensión fué perfecto; con velocidades que llegaron á 60 kilómetros por hora é intensidades de corriente á 6.000 voltios, de 160 amperios, no se produjo ninguna chispa perjudicial en el patín de contacto del trole. Estos resultados hacen pensar que una línea construída en las mismas condiciones podría soportar tensiones más elevadas, y que el funcionamiento á 10.000 voltios sería tan bueno como él á 6.000 voltios.

La conmutación de los motores monofásicos fué objeto de muchas críticas; se negó la posibilidad de ejecutar motores serie con corriente monofásica á 25 períodos que pudieran ofrecer una conmutación sin chispas, particularmente al arranque. Las pruebas sobre las locomotoras del ferrocarril del *Valle Brembana* han servido para demostrar que la conmutación de los motores, aun en las condiciones de arranque menos favorables, presentaban las características de una excelente conmutación, comparable á la de los mejores motores de corriente continua.

Se practicó la siguiente prueba:

Lanzada una locomotora en un sentido á la velocidad de 4 á 5 kilómetros por hora, se invirtió el campo de los motores; la locomotora se detuvo algunos segundos y partió en sentido inverso; las chispas en las escobillas fueron insignificantes.

El entretenimiento de los colectores es casi nulo, y las locomotoras maniobraron durante varios meses sin que hubiera habido necesidad de limpiar una sola vez el colector.

Las condiciones de arranque y de adherencia con las locomotoras monofásicas son sensiblemente las mismas que con las locomotoras de corriente continua. En horizontal, una locomotora es capaz de hacer recorrer á un tren, de 103 toneladas de peso, los 210 primeros metros en treinta y ocho segundos; la energía tomada al trole alcanza á 360 kilovatios.

El problema del rendimiento de la instalación dió lugar á varias pruebas, y las cifras que sirvieron de base á la comparación entre los proyectos resultaron confirmadas.

Prueba núm. 1.

Tren de prueba, una locomotora, 36 toneladas.

Tren de carga remolcada, 84 toneladas.

Trayecto de Bergamo á San Giovanni Bianco, 30 kilómetros.

Duración del recorrido (incluidas las paradas), una hora cincuenta y dos minutos.

Energía consumida en el trole por tonelada kilómetro, 37,5 vatios hora.

Factor de potencia en las arrancadas, 50 por 100 próximamente.

Idem de id. en id., 70 á 85 por 100.

Prueba núm. 2.

Tren de prueba, una locomotora, 36 toneladas.

Idem id. carga remolcada, 48 toneladas.

Trayecto de Bergamo á San Giovanni Bianco, 30 kilómetros.

Duración del recorrido (incluidas las paradas), una hora.

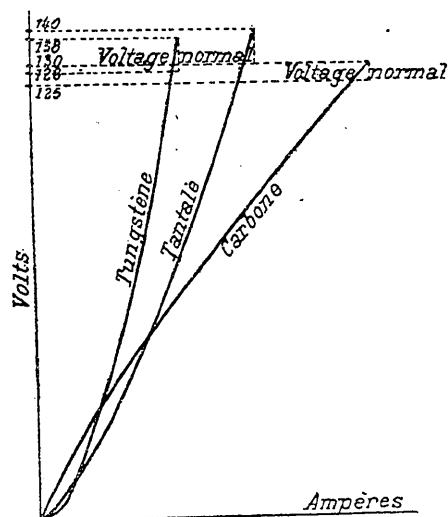
Energía consumida en el trole por tonelada kilómetro, 41,5 vatios hora.

Debe hacerse notar que entre Bergamo y San Giovanni Bianco hay una diferencia de altitud de 153 metros y que el trayecto de Bergamo-San Giovanni Bianco estaba dividido para el tren de prueba núm 1 en cinco paradas intermedias.—H.

RÉGIMEN DE FUNCIONAMIENTO DE LAS LAMPARAS DE INCANDESCENCIA CON FILAMENTO METÁLICO

El consumo específico de una lámpara de incandescencia está representado por la relación de la potencia eléctrica absorbida á la intensidad luminosa. En las lámparas con filamentos metálicos, la intensidad luminosa aumenta mucho, para una misma potencia absorbida; esto es debido á la vez al débil poder emisor y á la infusibilidad del metal que se puede llevar á temperatura muy elevada. Como la resistencia de un filamento metálico crece mucho con la temperatura, la intensidad de la corriente viene muy débil, á voltaje igual, y disminuye así la potencia eléctrica consumida.

M. Pécheux, ha trazado las curvas características del funcionamiento de estas lámparas, es decir, las intensidades en función de los voltajes, curvas que enseñan las variaciones de resistencia de cada lámpara, según el régimen. Estas curvas (figura 1.ª), reproducidas en la *Lumière Electrique* del 16 de Mayo, dicen que las lámparas con filamentos metálicos están menos



influidas que las de carbono por las irregularidades del voltaje E de las redes; además, una generatriz, á gasto igual, puede alimentar un número mucho más grande de lámparas, dando un mayor rendimiento para la fábrica eléctrica.

Si se designa por R la resistencia del filamento, la intensidad luminosa L está dada por una fórmula del tipo:

$$L = K (EI)^n,$$

ó puesto que

$$I = \frac{E}{R}$$

$$L = K \frac{E^{2n}}{R^n}.$$

Pero R es ella misma una variable en función de E , y esta función cambia con la duración del servicio de la lámpara, de suerte que el coeficiente y el exponente de la fórmula anterior varían con la edad de la lámpara y con el régimen según el cual ella funciona.

La utilización de las cifras de resistencia de las lámparas de los diversos tipos estudiados por M. Pécheux permite fijar el número de estas lámparas que se pueden instalar, todas las cosas iguales por otra parte, en una red en que se disponga de una potencia dada; por ejemplo, para una red á 130 volts, que se disponga de 600 amperes, se podrán alimentar (abstracción hecha de las pérdidas) próximamente 1.200 lámparas al carbón que dan 30.000 bujías decimales, ó 1.900 lámparas al tantaló (51.000 bujías), ó 2.800 lámparas al tungsteno (78.000 bujías). Y si la corriente se vende, por ejemplo, á 1.000 francos el kilovatio-año, la bujía-año costará respectivamente 2,50 francos, 1,50