

**ESTUDIO SOBRE LA APLICACION
DE LA TRACCION ELÉCTRICA EN LA SEGUNDA SECCION
DE LOS FERROCARRILES DEL ESTADO**

POR

HORACIO VALDES O., RAUL CLARO SOLAR
FRANCISCO HUNEEUS G. I ALBERTO LIRA O.

— • —
(Continuacion)

Desde luego fijaremos la seccion del alambre aéreo de servicio con la corriente media mas alta de las calculadas, la que corresponde a la segunda seccion, cuya sub-estacion estará en Angostura; admitiremos una reparticion igual a ámbos lados, pues dicha sub-estacion está situada próximamente en la mitad del trozo a que alimenta. Siendo la potencia total media absorbida en esa seccion de 645 kws. i adoptando el factor de potencia de 0,80 en los motores, la línea de servicio será recorrida para un voltaje de 7.500 volts, por una corriente de intensidad

$$i = \frac{645 \times 1.000}{7.500 \times 0,80 \times 2} = 54 \text{ ampères eficaces}$$

lo que conduciria a una seccion de 675 mm.².

Haí conveniencia, sin embargo, en impedir a toda costa la interrupcion del tráfico por inutilizacion del conductor de servicio, sea por cortadura, sea por falta de alimentacion debida a la fusion de la seguridad de un trozo a consecuencia de un corto circuito en la locomotora u otras causas. Ademas, la seccion estudiada, salvo una pequeña estension, es de simple via i, a fin de disminuir el desgaste del conductor como para reducir mas aun las pérdidas de tension, es lójico formar aquél con dos alambres colocados paralelamente a 0,20 m. de distancia, disponiendo el toma-corriente de las locomotoras, que será del sistema de arco Siemens, de 1 m. de largo mas o ménos, de modo que normalmente

los trenes que vayan en un sentido reciban la corriente por uno de los alambres y los que vayan en el otro sentido por el segundo conductor; naturalmente debe preverse que, con variarse simplemente la inclinacion del arco, pueda éste tomar los dos alambres o bien solo el que corresponde al movimiento en sentido contrario. En la estension de línea en doble via, cada una tendrá su conductor, i las locomotoras poseerán necesariamente un aparato especial para tomar la corriente del de la otra via cuando fuere urgente, disponiendo el tal aparato de modo que no interrumpa el servicio normal, o bien quitándolo cuando venga un tren en sentido opuesto.

La duplicacion del alambre de trolley no introduce complicacion alguna, pues están ámbos a una misma tension i en las estaciones las bifurcaciones pueden salir de cualquiera de los dos.

La alimentacion de ámbos se hará en unos mismos puntos, pero separadamente, por intermedio de fusibles protectores a fin de poder quitar del circuito uno de ellos, quedando el otro en servicio, cuando se efectúen reparaciones.

El conductor que se empleará será de cobre duro, silicoso, de seccion en 8, cuya riji-
dez en el sentido horizontal es mayor que la cilíndrica, facilitando así las curvas i dando mas seguridad para su colocacion. La seccion será de 65 mm.², área que puede soportar sin dificultad la corriente calculada de 54 ampères para el caso en que toda ella vaya por un solo conductor.

Ambos conductores serán llevados por alambres transversales de acero de 5 mm. de diámetro con el intermedio de aisladores que deben ser ensayados a 10.000 volts. Este alambre irá tendido entre dos postes de madera cuya altura será la suficiente para dejar los conductores a 5 m. sobre la via. La distancia entre soportes será de 35. m.

Pasemos ahora al cálculo de los alimentadores.

Cada una de las cinco secciones en que estará dividida la línea será servida por su sub-estacion, servicio que se efectuará por medio de alimentadores. Las cuatro primeras poseerán un alimentador para cada lado i, dada su longitud, se dividirá al conductor de trolley en tres partes a cada lado, uniéndose los alimentadores al segundo i tercer tercio, como se ve en el plano jeneral que se acompaña. El conductor de servicio estará interrumpido eléctricamente en todos los tercios, pero podrán sus secciones conectarse por medio de interruptores colocados en una celda al costado de la via; los de los extremos estarán separados a firme para la union con las otras secciones, así como los de los puntos de alimentacion, verificándose ésta siempre por separado en los tercios contiguos i por medio de interruptores automáticos o fusibles.

El otro conductor de la corriente será la via férrea; pero, a causa de la gran pérdida de voltaje debida a la fuerte inductancia del circuito, tanto por la distancia entre el conductor aéreo i la via cuanto por las condiciones magnéticas de los rieles de acero, existirá un conductor de cobre de la misma seccion que los alimentadores, que correrá paralelo a la via, subterráneo en los tercios extremos i aéreo en los demas, al cual se unirá eléctricamente la via cada kilómetro por conductores de cobre de la misma seccion.

El efecto de los feeders o alimentadores es simplemente reducir la pérdida de voltaje en la línea de servicio a un límite conveniente; por tanto, como se debe para ello tener en vista el punto de consumo máximo i colocado en las circunstancias relativas mas

desfavorables, bastará tomar la potencia máxima posible consumida en cada uno de los puntos extremos de las secciones i determinar con ella el conductor alimentador, siempre que la densidad de corriente no alcance a límites inadmisibles.

Como valor máximo de potencia consumida en un punto de la línea, hemos adoptado el de 1.000 H. P. i como pérdida de voltaje, por tratarse de corrientes monofásicas empleadas en motores-serie, con regulador de induccion que permite variar el voltaje aplicado a ellos entre límites muy estensos, se ha tomado 0,15 del voltaje teórico. Hai que advertir que esta pérdida no representa el 0,15 de pérdida de energía pues, como se verá, una gran parte de ella es debida a la inductancia del circuito, lo que no consume energía i solo influye en el factor de potencia.

La potencia, en corrientes monofásicas, se espresa por la fórmula

$$w = \eta e i \cos \phi$$

en la cual e i i son la tension i la corriente en el punto de partida o en la sub-estacion, η el rendimiento de la línea i $\cos \phi$ el factor de potencia en dicho punto, que será poco influenciado por el factor de potencia de los transformadores de las locomotoras, pues éste puede tornarse igual a la unidad, a plena carga.

La corriente de circulacion será segun esto, adoptando $\eta = 0,90$ i $\cos \phi = 0,95$, como se comprobará:

$$i = \frac{736 \times 1.000}{7.500 \times 0,90 \times 0,95} = 115 \text{ ampères}$$

El caso mas desfavorable se encuentra en la seccion comprendida entre Rengo i Rancagua con una distancia de 29 kms. i un feeder de 19,33 kms.

El cálculo de la caida de voltaje se efectuará descomponiendo el circuito en sus partes distintas a saber:

a) Entre la sub-estacion i el punto de alimentacion de los trolleys por el feeder; unccionarán en paralelo los dos conductores de trolleys i el feeder, repartiéndose la corriente en razon inversa de sus impedancias respectivas;

b) Entre el punto de alimentacion i el extremo de la seccion; trabajarán solo los conductores de servicio en paralelo;

c) Entre el extremo i el punto de alimentacion; trabajará la via en paralelo con el conductor auxiliar, con reparticion de corrientes en la forma dicha;

d) Entre el punto de alimentacion i la sub-estacion; trabajará en paralelo la via con el conductor auxiliar, como en el anterior, pero habrá una reparticion diversa por la diferencia de impedancias kilométricas a causa de la diferencia de posicion relativa de los conductores de ida i de vuelta.

En cada trozo de los citados se debe verificar el cálculo de la caida de voltaje, lo que se efectua por la siguiente fórmula:

$$V = l i \sqrt{r^2 + a^2} L^2 = l i J$$

en la cual:

l = longitud del trozo, en kilómetros,

i = corriente calculada de 115 ampères,

r = resistencia del conductor por kilómetro,

$a = 2 \pi f$ (siendo $f = 25$ períodos por segundo),

L = inductancia del conductor, en Henrys por kilómetro,

J = impedancia total del trozo ($J = \sqrt{r^2 + a^2 L^2}$).

La inductancia del trozo se calcula por la fórmula

$$L = 2 \log_e \frac{d}{\rho} + \frac{\mu}{2}$$

en la cual:

e = base de los logaritmos neperianos,

d = distancia entre los conductores de ida i vuelta en el trozo, en cm.,

ρ = radio del conductor, en cm.,

μ = permeabilidad magnética del conductor (para el cobre $\mu = 1$, para la vía $\mu = 120$).

Verificados los cálculos para la seccion indicada, con un feeder compuesto de dos conductores de 8,8 mm. de diámetro i un conductor auxiliar igual al feeder i adoptando para la distancia d los valores siguientes

$$d_1 = 0,60 \text{ m.}$$

$$d'_1 = 5 \text{ m. (trolleys)}$$

$$d_2 = d'_2 = 5 \text{ m.}$$

$$d_4 = 0,60 \text{ m.}$$

$$d'_4 = 5 \text{ m. (via.)}$$

se ha obtenido una pérdida de voltaje de

$$V \text{ total} = 1.950 \text{ volts}$$

lo que representa un 14,1% del voltaje de orijen.

La pérdida de enerjía alcanza a

$$W \text{ total} = 88 \text{ kws.}$$

es decir un 10,5%.

El factor de potencia será:

$$\cos \phi = \frac{736 + 88}{736 + 1,050 \times 115}$$

$$\cos \phi = 0,96$$

adoptando $\cos \phi = 1$ en los transformadores de la locomotora,

En vista de la pequeña diferencia que existe entre las longitudes de las cuatro secciones, para disminuir un poco las pérdidas i por fin con el objeto de emplear conductores lo mas uniformes que se pueda, se ha adoptado para las cuatro secciones una disposicion igual a la indicada resultando así pérdidas máximas que varían entre 14 i 8% .

La pérdida media mas alta resultante, que corresponde al trozo de Angostura a Rancagua, con una potencia media de 361 kws, i una corriente de 69 ampères, alcanza a 7% ; la pérdida media fluctúa entre este valor i 3,7% para las diversas secciones.

En la quinta seccion, la distribucion se verificará por medio de dos feeders por cada lado que alcanzara los $\frac{2}{3}$ i $\frac{1}{3}$ de la longitud total. Existirá separacion eléctrica a firme, aunque con interruptores, en los conductores de servicio, en los extremos i en los puntos de alimentacion; en todos los demas puntos habrá fusibles o interruptores automáticos.

Adoptando los mismos valores que en los casos anteriores para la potencia máxima i corriente, con feeders de $2 \times 8,8$ mm. de diámetro i conductor auxiliar de la misma seccion, i efectuando el cálculo de la caída de voltaje en las seis partes en que se descompone el circuito, se llega a una pérdida de

$$V = 1.165 \text{ volts}$$

o sea un 15,5% sobre el valor inicial de 7.500 volts.

Los valores de la pérdida de energía i de factor de potencia resultan aproximadamente los mismos que en los casos anteriores.

En todas las secciones, los alimentadores irán colocados sobre los postes que llevan los conductores de servicio i sus condiciones de aislamiento serán análogas

Con los datos obtenidos anteriormente, podemos calcular el peso de cobre de la red secundaria.

Admitiendo un desarrollo de 10 kms. para las bifurcaciones de los conductores de servicio, se obtiene:

líneas de servicio	
peso.....	$2 \times 260 \times 8,9 \times 65 = 300.030 \text{ k.}$
alimentadores i conductor auxiliar	
longitud de alimentadores.....	$128 + 78 \text{ km.} = 206 \text{ km.}$
longitud de conductor auxiliar.....	$250 + 26 \text{ »} = 276 \text{ »}$
total.....	<u>482 km.</u>
peso.....	$2 \times 482 \times 8,9 \times 60,8 = 521.639 \text{ k.}$

7. *Sub estaciones de transformacion.*—La potencia de las sub-estaciones es fijada por la potencia máxima en cada una de ellas, que hemos tomado igual a 2.000 H. P.

Como el factor de potencia puede bajar a 0,95, a fin de evitar sobrecargas, daremos a los transformadores una potencia aparente de 1.899 kilovolts-ampères.

Cada sub-estacion se compondrá, pues, de siete transformadores trifásico-monofásicos sistema Ulbricht, de 300 kilovolts-ampères cada uno, de los cuales uno será de reserva. Deben ser contruidos para dar 8.000 volts monofásicos para compensar las pérdidas de transmision i para recibir 30,000 volts del lado trifásico como tension compuesta, i con la frecuencia de 25 períodos por segundo.

Todos ellos funcionarán en paralelo e irán protegidos por fusibles i pararrayos en sus dos lados. Su ventilacion deberá hacerse por corriente natural sin exigir bomba.

Cada sub-estacion irá colocada en una pequeña celda de albañilería, bien cerrada i con facilidades para la ventilacion.

Antes de pasar al cálculo de las líneas de transmision, creemos oportuno advertir que esta distribucion, calculada bajo la base de cinco sub-estaciones, no constituye sino una de las soluciones de la distribucion i que, para llevar a cabo un proyecto definitivo será necesario estudiar varias otras a fin de establecer su comparacion económica.

Sin embargo, para dar a conocer los valores entre los cuales pueden variar las diversas soluciones posibles, haremos un estudio a la lijera de la otra solucion extrema, cual es la de admitir el número de sub-estaciones necesario para suprimir los alimentadores i conductores auxiliares, dejando los dos conductores de trolley i la vía solos como conductores de corriente.

Partiendo de las mismas bases admitidas, es decir, de una pérdida máxima de 15% o sea de 1.125 volts para una corriente de 115 ampères correspondiente próximamente a 1.000 HP colocados en una estremidad de la seccion, se ha llegado a los resultados siguientes:

impedancia kilométrica de los conductores de trolley de 65 mm ² .	0,282. ohms
» » de la vía	1,10. »

La longitud de línea doble que produce una pérdida de 1.125 volts será

$$l = \frac{1.125}{115 \times 1,382} = 7,1 \text{ km.}$$

Por consiguiente, el radio de accion máximo de cada sub-estacion será 7,1 km. i la distancia media entre sub-estaciones resulta de 14,2 km.

El número de sub-estaciones requeridas seria igual a

$$n = \frac{250}{14,2} = 18$$

Se puede advertir ademas que no se disminuirá apreciablemente este número por un aumento de la seccion de los conductores de trolley porque la gran impedancia del circuito se debe en su mayor parte a la inductancia de la vía i de esos mismos conductores, siendo esta última mui poco afectada por el mayor diámetro.

Por otra parte, la potencia máxima de las sub-estaciones no podria bajar de 1.200 HP para cada una, de modo que, adoptando la misma proporcion de reserva que en el

caso anterior, tendríamos una potencia máxima aparente por sub-estacion de 1.300 kws. i un total de

$$18 \times 1.300 = 23.400 \text{ kws.}$$

Adoptando como precio 40 \$ por kw. instalado en la primera solucion i 45 \$ en la segunda, por el mayor número de edificios i aparatos protectores, i como precio del cobre 1.200 \$ por tonelada, se obtiene la comparacion siguiente:

primera solucion.

2.100 × 5 = 10.500 kws. a 40 \$	\$	420.000
522 ton. de cobre a 1.200 \$		626.400
total	\$	1.046.400

segunda solucion.

23.400 kws. a 45 \$	\$	1.053.000
---------------------------	----	-----------

Se vé que la diferencia es pequeña i lo mismo seria la de otra solucion intermedia. Sin embargo es indudable que serán menores los gastos de conservacion i mayor su rendimiento miéntras menor sea el número de sub-estaciones. Ademas las líneas de trasmision serán mas largas i costosas miéntras mayor sea dicho número.

Por fin podria calcularse la distribucion sobre una tension de 10.000 volts que, como se sabe, en los ensayos de Alemania ha dado buen resultado, obteniéndose con esta variacion una economía de mas de 30% del costo de conductores bajo las mismas pérdidas.

8. *Cálculo de las líneas de trasmision.*—Adoptándose la trasmision trifásica, queda por fijar su voltaje pues su frecuencia será igual a la de las corrientes de servicio, es decir, de 25 períodos por segundo.

En el estado actual de las trasmisiones, se podria proyectar ésta a 50.000 volts, dada la distancia máxima de alimentacion que es de 137 km; pero, en vista de que la seccion de los conductores no puede bajar de cierto límite, de la conveniencia de subdividir las líneas en dos a fin de evitar interrupciones i para no exajerar las dificultades de aislamiento, aun cuando este voltaje es práctico desde hace varios años, hemos fijado el de 30.000 volts como tension compuesta, para la trasmision a todas las sub-estaciones

Con el fin de no hacer solidarias varias sub-estaciones de las pérdidas de voltaje por línea producidas por una de ellas, se ha llevado a cinco el número de líneas independientes, de las cuales dos partirán de la Central hácia el norte i tres hácia el sur.

El cálculo de las líneas deberá tener por base: por una parte, la densidad de corriente que se puede admitir en los conductores, tomando en cuenta la consideracion económica, i por otra, la pérdida de voltaje admisible en ellas. La primera deberia calcularse por la fórmula ya indicada, variando para este caso solo el factor que representa el costo del watt-hora suplementario; pero, en vista de que este dato solo se puede obtener exac-

tamente despues de hechos todos los estudios, i de que aun deberia deducirse de varios tipos de Centrales eléctricas i teniendo presente que su variacion es pequeña, adoptaremos tambien en el caso presente la densidad de 0,8 ampères por mm.² de seccion transversal de conductor.

Sin embargo habrá casos, mui frecuentes, en que la seccion de los conductores deberá ser fijada en vista de no hacer subir la caída de voltaje de un limite compatible con el buen servicio de los receptores. En estos casos se calcularán las secciones transversales con la corriente máxima que circule en ellos, la que no deberá producir una caída de voltaje, debida a la resistencia óhmica i a la inductancia, superior al limite fijado. Este valor puede en el caso actual estimarse en 0,10 del voltaje inicial de 30.000 volts.

En las líneas en que pueda calcularse su seccion con la corriente media cuadrada i con la densidad económica, siempre que la pérdida de voltaje descienda de 3.000 volts, deberá adoptarse este método.

Basándonos en las consideraciones anteriores se han calculado las cinco líneas de transmision, como se vé en el cuadro que sigue. Para el cálculo de las corrientes se ha admitido para la carga máxima un factor de potencia de 0,98 i rendimiento de conjunto de 0,90, que son los que resultan próximamente, i para la carga media un factor de potencia total de 0,95 i rendimiento combinado con el de los trasformadores de 0,95.

DESIGNACIONES	SUB ESTACIONES				
	San Bernardo	Angostura	Rengo	Quinta	Camarico
Potencia máxima.....	H. P. 2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Corriente máxima de circulacion.....	amp. 33	33	33	33	33
Potencia media.....	kws. 458	645	523	396	465
Corriente media de cálculo.....	amp. —	13,8	11,2	—	—
Lonjitud de la línea de transmision.....	km. 73	35	20	77	137
Diámetro de los conductores.....	mm. 5,5	4,7	4,2	5,5	7,5
Pérdida máxima de voltaje en.....	% 9,4	6,2	6,6	10	10,6
Peso de cobre.....	ton. 46,2	16,25	11,05	48,8	161

Como se vé, el peso total de cobre en las transmisiones es igual a 283,3 toneladas.

Las líneas de transmision serán llevadas por una serie de postes sólidos de madera de 12 m. de alto, de los cuales 2 m. bajo tierra e impregnados, excepto en las tres líneas hacia el sur que convendrá llevar sobre postes metálicos enrejados hasta la primera subestacion; en esta extension las dos líneas de mas al sur iran en una sola. La distancia entre postes será de 40 m. i en ninguna seccion deberá quedar una sola línea trifásica, descomponiéndola en dos a fin de permitir las reparaciones. Todas las líneas podrán auxiliarse unas a otras por medio de interruptores en cada fin de seccion i serán protegidas por pararrayos i fusibles en sus estremidades.

Los conductores en cada línea deberán formar un triángulo equilátero de 1 m. de lado i serán llevados por aisladores de triple campana ensayados a 50.000 volts.

El número total de postes será

$$25 \times (73 + 137) = 6.050$$

De los cuales

$$25 \times 30 = 750$$

serán de fierro enrejados.

Estos son solo valores aproximados por cuanto las travesías de rios i caminos i las curvas podrán aun alterar estas cifras.

9. *Planta jeneratriz.*—La planta jeneratriz debe ser calculada para la potencia máxima total consumida en línea, la que alcanza a 5.000 H. P.

Para el caso de plena carga de la Central, que no coincidirá con el de plena carga de las líneas ni de las sub estaciones, como se puede comprobar fácilmente, se adoptarán los rendimientos siguientes:

locomotoras i líneas secundarias.....	0,80
sub-estaciones.....	0,95
líneas de transmision....	0,92

La potencia que debe producir la Central será pues de

$$\frac{5.000}{0,80 \times 0,95 \times 0,92} = 7.150 \text{ H. P.}$$

o sea

$$P = 5.262 \text{ kws.}$$

Con un factor de potencia de 0,97, la potencia aparente resulta de

$$\frac{5.262}{0,97} = 5.420 \text{ kilo volts ampères}$$

Este valor será proporcionado por la Central a una tension de 30.000 volts, por 10 transformadores trifásicos de 750 kilo-volts-ampères cada uno, siendo dos de ellos para reserva. Se obtiene así una potencia aparente, si el rendimiento de ésta es de 0,975, de 5.570 kilo-volts-ampères.

Los transformadores elevadores serán alimentados a 3.000 volts por los alternadores trifásicos de los grupos electrójenos.

Estos, contando uno de reserva, serán 5, compuestos de un alternador trifásico de 1.500 kilo-volts-ampères a 3.000 volts, directamente acoplado a una turbina de eje horizontal, doble, hélico-centrípeta de 2.000 H. P. con regulador automático.

Siendo el rendimiento de estas turbinas de 0,80 a plena carga, la potencia hidráulica máxima necesaria será

$$P_i = \frac{2.000 \times 4}{0,80} = 10.000 \text{ H. P.}$$

que sobre 25 m. de caída requiere un gasto de agua de

$$Q = \frac{10.000 \times 75}{25} = 30 \text{ m.}^3 \text{ por segundo.}$$

Las turbinas serán alimentadas cada una por una cañería forzada, de palastro de acero, de 2 m. de diámetro, capaz de evacuar 7,5 m.³ con una velocidad de 2 m. por segundo, valor usado para estos casos.

Las exitatrices de los alternadores serán dos de 150 kwts cada una a 125 volts, llevadas por turbinas independientes, con una sola cañería de 1 m. de diámetro.

10. *Plan de trabajos para llevar a efecto la transformacion sin entorpecer el servicio. Explotacion del servicio eléctrico.*—Dado el carácter incompleto del presente trabajo, carácter que ha debido tener por las razones espuestas en la introduccion, no nos ha sido posible examinar en detalle el plan de trabajos por adoptar para llevar a cabo la transformacion sin suspender el servicio, así como la explotacion del servicio eléctrico. Bástenos solo hacer presente que esta última deberá verificarse en lo posible siguiendo las normas establecidas en el sistema actual i que los nuevos servicios creados solo se refieren a los de funcionamiento de la planta jeneratriz i a los de inspeccion i mantenimiento de líneas eléctricas i sub-estaciones.

(Continuará)

