

## ELECTRIFICACIÓN DE FERROCARRILES

## Estudios sobre su conveniencia económica

## II

## Métodos expeditos

En el artículo anterior <sup>1</sup> se ha demostrado que los límites de mínima economía señalados por dos procedimientos expeditos para una electrificación propuesta varían, difieren considerablemente, de tal modo que líneas electrificables en uno de ellos no lo son en el otro, existiendo una amplia zona de indecisión que forzosamente ha de complicar los primeros trabajos de la Comisión. Además, los gráficos correspondientes no son aplicables, teniendo que recurrir ineludiblemente a las fórmulas origen de aquéllos, y perdiendo entonces los procedimientos su carácter de expeditos. Los ejemplos que hemos puesto muestran evidentemente, por sus resultados antagónicos, que ni aun son suficientes para un primer grado de aproximación <sup>2</sup>.

Las causas de poca exactitud, detalladas en el trabajo dicho, no existen, o, por lo menos, son inferiores en nuestro procedimiento. Demostrar esta mayor exactitud, y lo que es más importante, que los gráficos nuestros son aplicables a cualquier línea, porque los costes de electrificación varían automáticamente al variar las características de cada línea, es el objeto de todo lo que sigue.

## FÓRMULAS DE NUESTRO PROCEDIMIENTO.

Tal como se ha dicho antes, el fundamento de todo procedimiento del cálculo de la economía que una electrificación introduce, o, más propiamente, de

$$0,012 r T g - 0,00275 \frac{1}{\rho \beta} r T g' \text{ ptas. anuales [8]. Líneas de pendiente débil, } I \approx r$$

$$0,006 (I + r) T g - \frac{9,81}{7200} [I + r] \frac{1}{\rho \beta} T g' \text{ ptas. anuales [9]. Líneas de fuertes pendientes, } I \approx r$$

donde  $g$  = precio kg carbón sobre ténder,  $g'$  = precio kw-h en la entrada de las subestaciones,  $\rho$  = rendimiento de la locomotora eléctrica de las llantas al pantógrafo,  $\beta$  = rendimiento del sistema de distribución eléctrico.

El único supuesto algo discutible—pues los demás, incluso la pendiente característica, son perfectamente admisibles—es que el tráfico  $T$  total se reparta por igual en ambos sentidos. Evidentemente que esto no se cumple la mayoría de las veces, pero aproximadamente puede admitirse, ante el deseo de hacer la

determinar la condición de la electrificación conveniente, estriba en lo que hemos llamado «ecuación de mínima economía» <sup>1</sup>.

$$G_v - G_e - C = 0 \quad [7]$$

El desarrollo de los términos de esta ecuación es sumamente difícil si se quiere tener en cuenta todos los gastos de explotación de un ferrocarril. Pero al pretender hallar la diferencia se ve fácilmente que desaparecen (es decir, no es necesario su análisis) todos aquellos gastos que no son afectados por el cambio de sistema de tracción, lo que constituye una gran simplificación. Quedan afectados los siguientes gastos: energías consumidas, conservación de locomotoras, personal de las mismas, depósitos y otros gastos de los mismos, alimentación de agua y engrase de locomotoras. Del lado de la tracción eléctrica aparecen, en cambio, los gastos de conservación de líneas y subestaciones. No haremos mención de los gastos de conservación de la vía porque son muy reducidas las economías del lado de la tracción eléctrica, y ponemos así en hipótesis pesimista sobre ésta. Queda la ecuación [7] reducida así a cuatro términos:

Diferencia de energías consumidas + economías por los gastos de Material y Tracción distintos del combustible, — gastos de conservación de líneas y subestaciones, — cargas del capital de electrificación = 0.

*Primer término.*—Si  $T$  es el tráfico en ton-km brutas totales y anuales, y que en ambos sentidos de circulación se reparte en partes iguales  $\frac{T}{2}$ ;  $I$  = pen-

diente característica de la línea,  $r$  = resistencia del tren en kg/ton, valor medio de horizontal y curvas, se tiene fácilmente la siguiente expresión:

fórmula expedita y que refleje la influencia de la pendiente y del tráfico total. Al lado de los supuestos hechos en los procedimientos anteriores, especialmente el de Parodi, tiene el nuestro mayor exactitud, ya que frecuentemente se compensará la diferencia entre los tráficos en ambos sentidos de circulación con sus pendientes respectivas.

Pero si se quiere mayor exactitud, el primer término de la ecuación [7] puede expresarse de esta forma. De la contabilidad de las Compañías se deduce el consumo de carbón por ton-km; sea  $k$  kilo-

<sup>1</sup> Página 175 de la REVISTA del 15 de mayo.

<sup>2</sup> Del mismo modo podríamos comprobar que apenas ninguna línea distinta de las principales de M. Z. A. y Norte es electrificable, según estos procedimientos, o, mejor, según sus gráficos.

<sup>1</sup> Rogamos al lector consulte la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS de 15 de febrero, 1.º y 15 de marzo y 1.º de abril de 1927, páginas 70, 89, 111 y 139, donde se expone este método con todo detalle.

gramos. Si cada kg de carbón puede ser sustituido por  $\frac{1}{3}$  de kw-hora, medido a la entrada de las sub-

estaciones para líneas planas o de débil pendiente, y por  $\frac{1}{3,30}$  para líneas de fuerte pendiente, se tiene

$$Tkg - \frac{k}{3} Tg' \text{ ptas. anuales [10]. Líneas de débil inclinación, } I \approx r$$

$$Tkg - \frac{k}{3,30} Tg' \text{ ptas. anuales [11]. Líneas de fuertes pendientes, } I \approx r$$

pero estas fórmulas ya no contienen directamente las pendientes de la línea.

*Segundo término.*—Si  $a, b, c, d, e$  representan los gastos, en la tracción por vapor, de material y tracción distintos del combustible, se demuestra que las economías que introduce la electrificación vienen dadas de un modo aproximado por <sup>1</sup>

$$0,50 a + 0,25 b + 0,45 c + d + 0,35 e \text{ ptas. por ton-km. [12]}$$

no debiendo considerarse otros gastos, porque los demás no son prácticamente afectados por el cambio de tracción. En el próximo artículo razonaremos los coeficientes dados, cuyo conjunto 0,51 medio coincide con el valor global de la economía que M. Parodi ha dado en sus recientes conferencias de Barcelona. Pero en lugar de suponer, como Lucia, un valor único global, preferimos dejar subsistentes los componentes  $a, b, c, d, e$  de este capítulo de economías. Los resultados económicos del Pajares y F. C. Suizos <sup>2</sup> son algo superiores a estos valores medios.

Para el tráfico total  $T$  tendremos que la economía por electrificación será

$$(0,50 a + 0,25 b + 0,45 c + d + 0,35 e)T \text{ ptas. anuales}$$

Los valores  $a, b, c, d, e$  son muy fáciles de obtener

$$0,012 r Tg - 0,00275 \frac{1}{\rho\beta} r Tg' + [0,5a + 0,25 b + 0,45 c + d + 0,35 e]T - [0,025 C_L + 0,0075 C_S] - 0,08 A_e = 0 \quad [14]$$

$$T \left( kg - \frac{k}{3} g' \right) + [0,5 a + 0,25 b + 0,45 c + d + 0,35 e] T - (0,025 C_L + 0,0075 C_S) - 0,08 A_e = 0 \quad [15]$$

*Líneas de fuertes pendientes, } I \approx r.*

$$0,006(I+r) Tg - \frac{9,81}{7200} [I+r] \frac{1}{\rho\beta} Tg' + [0,5a + 0,25 b + 0,45 c + d + 0,35 e]T - (0,025 C_L + 0,0075 C_S) - 0,08 A_e = 0 \quad [16]$$

$$T \left( kg - \frac{k}{3,30} g' \right) + [0,5 a + 0,25 b + 0,45 c + d + 0,35 e] T - (0,025 C_L + 0,0075 C_S) - 0,08 A_e = 0 \quad [17]$$

Estas fórmulas son generales; las [14] y [16] menos exactas, pero más expeditas, reflejando mejor la influencia de las pendientes de la línea. Se ha objetado a estas fórmulas su complejidad. Pero no es enteramente exacto, pues de la contabilidad de las Compañías y de los presupuestos de electrificación—que deben ser siempre hechos al pretender estudiar la conveniencia de una electrificación—se obtienen rápidamente los coeficientes que en ellas entran <sup>3</sup>.

Permiten, además, obtener: el tráfico mínimo de electrificación, el consumo límite económico de car-

de la contabilidad del ferrocarril que se pretenda electrificar.

*Tercer término.*—Basándose en las más serias estadísticas, se ha encontrado que los gastos de conservación de líneas y subestaciones eléctricas puede, aproximadamente, darse en función del coste actual de la electrificación por:

$$0,025 C_L + 0,0075 C_S \text{ ptas. anuales, [13]}$$

donde  $C_L$  = coste total de las líneas eléctricas,  $C_S$  ídem subestaciones (en Pajares los coeficientes son 0,021 y 0,0080, sensiblemente iguales a los de la fórmula).

*Cuarto término.*—Si  $A_e$  es el coste total de la electrificación, y tomamos el 8 por 100 como intereses y amortización del capital invertido, las cargas derivadas vendrán dadas por:

$$0,08 \cdot A_e \text{ ptas. anuales}$$

De este modo, la ecuación fundamental de mínima economía será representada por:

*Líneas de pendiente débil, } I \approx r.*

bón, las economías netas, las brutas, el consumo de energía eléctrica, el coste mínimo económico de electrificación, etc. *La existencia de economías netas indica la conveniencia de la electrificación.*

Naturalmente que podemos llegar a una simplificación grande a costa, claro está, de supuestos que disminuyen la exactitud, y ello lo hacemos después. Apliquemos esto ahora a un ejemplo:

*Línea de Vigo-Pontevedra.*

Esta línea la hemos tomado como tipo de electrificación dudosa, económicamente considerada. Tenemos así:

Pendiente característica: 8,3 mm. Pendiente máxima: 13,4.  
Longitud de electrificación:  $L = 34$  km.  
Tráfico total de electrificación: 1 200 000 ton-km por kilómetro = 40 800 000 ton-km. Totales anuales.  
Precio de energía eléctrica:  $g' = 0,06$  ptas.  
Ídem kg de carbón sobre tender:  $g = 0,07$  ptas.

<sup>1</sup>  $a$  = gastos de conservación de locomotoras,  $b$  = personal ídem,  $c$  = depósitos,  $d$  = alimentación de agua,  $e$  = engrase de locomotoras.

<sup>2</sup> *Bulletin de l'Association internationale de Ch. de F.*

<sup>3</sup> Sin auxilio de nadie los hemos obtenido para más de 50 líneas, en breve tiempo, al efectuar el Plan de Electrificación, que dimos en los números citados de la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS.

Gastos de Material y Tracción: de los datos estadísticos de la Compañía, muy completos, se obtiene fácilmente:

$$a + b + c + d + e = 0,004511$$

$$0,5a + 0,25 \cdot b + 0,45c + d + 0,35e = 0,002531 \text{ ptas. ton-km}$$

(El promedio de M. Z. A. y Norte es: 0,00154 ptas. ton-km. inferior al de esta línea.)

Coefficientes:  $\rho = 0,85, \beta = 0,60.$

$p = 0,10$  kg por ton-km de trabajo total.

Costes de electrificación: líneas eléctricas = 1 190 000 ptas. Subestaciones = 600 000 ptas. Total, incluidas las locomotoras y automotores necesarios para el tráfico supuesto, = 3 110 000 ptas., o sea 100 000 ptas. aproximadamente por kilómetro de línea <sup>1</sup>.

Aplicando la fórmula [17] se obtiene:

|  |   |             |
|--|---|-------------|
| 1.º Economías por combustible y energía.....                                     | } Coste de carbón..... 285 600 pts.<br>Idem energía eléctrica. 73 440 — |             |
|  |   | 213 160 —   |
| 2.º Economías por gastos de Material y Tracción, distintos del combustible ..... |   | 103 000 —   |
|  |   | 316 160 —   |
| 3.º Gastos de conservación de líneas y subestaciones .....                       |   | 32 800 —    |
| 4.º Economías brutas .....   |   | 283 360 —   |
| 5.º Cargas del capital de electrificación.....                                   |   | 248 800 —   |
| 6.º Economías netas .....  |   | 34 560 pts. |

Luego la electrificación es conveniente económicamente, ya que existen economías netas. También se obtiene:

7.º Consumo mínimo económico de combustible: La fórmula [17] da:

$$X \cdot 0,07 - 73 400 + 103 000 - 32 000 - 248 800 = 0$$

$$X = 3 590 \text{ ton-carbón, totales.} = 105 \text{ ton-carbón por km de línea.}$$

|                                    |     |   |   |
|------------------------------------|-----|---|---|
| La fórmula de Parodi en este caso: | 57  | — | — |
| La fórmula de Lucia da:            | 117 | — | — |

Los dos últimos son resultados comparables <sup>2</sup>, notándose que el nuestro se halla comprendido entre los otros dos, como no podía menos de ser, dada la mayor exactitud de nuestro procedimiento. Por último, como el consumo real por kilómetro, en la línea dada, es de 120 ton, la conveniencia de la electrificación queda probada.

8.º Se ha objetado a nuestro procedimiento, según hemos dicho, que el suponer que el tráfico se reparte por igual en ambos sentidos, es una causa de gran error. Los trabajos del Sr. Lucia se basaron en igual supuesto; vaya esto por adelantado. Además, calculando en este ejemplo por la fórmula [16], se obtiene:

Economías por combustible y energía, 231 160 pesetas, en contra de 213 160, halladas sin esta causa de error, que demuestra el poco fundamento de esta objeción y que en nada altera los resultados finales, de forzosa aproximación.

<sup>1</sup> Véase cómo no es posible considerar un mismo coste de electrificación para todas las líneas, porque varía con el tráfico. Por ello, repetimos, no son aplicables los gráficos de Parodi y Lucia.

<sup>2</sup> Entiéndase bien que estos números de Parodi y Lucia se deducen de las fórmulas, haciendo variar el coste kilométrico de electrificación. Los gráficos no pueden aplicarse, dando valores muy distantes de los presentes, 77 y 200 ton de carbón, quedando demostrada una vez más la ineficacia de estos gráficos.

Creemos, sinceramente, que el estudio de la economía probable de una electrificación queda así más completo que por ningún otro método, y con mayor exactitud <sup>1</sup>. No sólo hemos encontrado la demostración de la conveniencia económica—conveniencia que era negada por los métodos de Parodi y Lucia, seguidos por sus gráficos—, sino también el grado, la cuantía aproximada de esa conveniencia. En nuestras fórmulas aparecen con toda claridad las influencias del tráfico y pendientes de las líneas, únicos factores verdaderos, decisivos, en todo estudio de esta naturaleza. Definir el grado de conveniencia de una electrificación por el carbón consumido, es un método indirecto y nada científico en materia ferroviaria, pues, el consumo de carbón no es más que una mera consecuencia del tráfico y de la pendiente. Por último, si nuestro procedimiento es expedito en cuanto a las fórmulas, ha quedado demostrado, y los gráficos que después se dan completan este carácter, aunque son forzosamente de menor exactitud. Antes de exponerlos, calculemos todavía la conveniencia económica de otras líneas de dudosa conveniencia y de un gran interés.

*Línea Bobadilla-Algeciras.*

Se tiene, sucesivamente:

$I = 13$  milésimas.

$I_m = 20$  ídem.

Longitud de electrificación: 177 kilómetros.

Coste del carbón: 50 ptas. <sup>2</sup>.

Energía eléctrica: 0,08 ptas., suponiendo lo mismo que en todo este trabajo.

En cuanto al tráfico, no hemos encontrado en los datos de la Compañía el correspondiente a esta línea, separadamente de las demás. El tráfico medio de la red de Andaluces viene a ser 900 000 ton-km por kilómetro (datos Memoria 1927). Puede admitirse como tráfico de electrificación de esta línea, teniendo en cuenta el aumento probable y que actualmente es la más recargada, 2 000 000 de ton-km/km.

Respecto al coste de electrificación, aunque no disponemos de un presupuesto concienzudamente hecho, es evidente que no puede tomarse el señalado por Lucia en las líneas del Norte, 170 000 ptas-km, porque el tráfico es muy inferior. Partiendo de la casi constancia del coste para el material fijo (fundamento del método de Parodi) y hallando el del material móvil para el tráfico correspondiente, hemos obtenido 22 000 000 de ptas. <sup>3</sup>, que es a razón de 120 000 ptas. por km, y no excederá de esta cifra. Con todos estos valores, aplicando la fórmula [16] se tiene, suponiendo que los gastos de Material y Tracción sean análogos, al promedio de M. Z. A. y Norte:

|  |                 |   |
|--|-----------------|---|
| 1.º Economías por energía .....                  | = 624.000 ptas. | } Economía total = 1 189 260 pesetas anuales. |
| 2.º Economías por gastos M. y T. = 565.260 ptas. |                 |   |

<sup>1</sup> La Compañía del Chicago M. St. Paul, la mayor electrificación mundial, sigue estas normas en el estudio económico detenido que hace de su explotación 1923.

<sup>2</sup> De la Memoria de la Compañía no he podido deducir si este precio es el de mera adquisición de carbón, o sobre tender. Pero los resultados finales no varían grandemente.

<sup>3</sup> Líneas, 6 195 000; subestaciones, 3 000 000; material móvil, 12 000 000. Total: 22 000 000.

Primera observación importante: las economías por gastos de Tracción son mayores que las debidas al combustible, a causa de que el kilogramo de carbón cuesta a la Compañía de Andaluces considerablemente más barato que en las demás líneas de las Compañías importantes, 0,50 y 0,70 pesetas, respectivamente.

|  |                  |       |
|--|------------------|-------|
| 3.º Gastos de conservación de línea y subestaciones..... | 177 500          | ptas. |
| 4.º Cargas del capital de electrificación, 8 % .....     | 1 760 000        | »     |
| <i>Gastos totales</i> .....                              | <u>1 937 500</u> | ptas. |

Como los gastos son 1 937 500 ptas. y las economías brutas 1 189 260 ptas., no hay economías netas, y, por tanto, la línea *no es electrificable*, desde el punto de vista económico, y aun suponiendo un tráfico mayor que el actual. Esto es debido al costo reducido de adquisición del kilogramo de carbón.

5.º El tráfico mínimo necesario para que la electrificación sea económica, no puede obtenerse con la ecuación [16], porque al variar el tráfico varía forzosamente el coste de electrificación.

Ello es sólo posible encontrando la ecuación de mínima economía en función sólo de las pendientes de la línea y del coste de electrificación por kilómetro. Se verá, que a 70 pesetas la tonelada de carbón sobre tender y 0,08 pesetas el kw-hora, el tráfico mínimo necesario es del orden de 3 000 000 de ton-km/km, muy superior al actual.

6.º Conservando constante el tráfico supuesto, y el coste de electrificación, y el precio actual del kilogramo de carbón sobre tender, el precio del kw-hora máximo económico resulta por [16] igual a

Precio del kw-h máximo económico = 0,01 ptas.

y este precio no se puede alcanzar en la región del ferrocarril para la producción de la energía eléctrica.

7.º Si la línea no es electrificable, económicamente considerada, hay razones que aconsejan su electrificación, mas no esencialmente económicas. Estas fueron enunciadas en el trabajo nuestro aludido, y nos determinaron

a incluir la línea en el Plan de Electrificación que propusimos entonces.

8.º Es evidente que limitándose sólo a obtener el consumo mínimo económico de carbón no se estudia suficientemente la conveniencia económica ni se encuentran las conclusiones concretas de nuestro procedimiento. Los métodos de Parodi y Lucia caen en defecto cuando se trata de estudiar una línea de conveniencia de electrificación dudosa.

\* \* \*

De cuanto antecede se deducen estos tres principios fundamentales para el estudio de la economía de una electrificación:

a) Aun sin salir del campo propio de los métodos expeditos, las variaciones en los límites de la condición de mínima economía son muy grandes. Es preciso, pues, eliminar todas las causas de error posibles, acudiendo para ello al procedimiento más exacto, que refleje las variaciones e influencias de las características del tráfico ferroviario: tráfico y pendiente.

b) La condición de *electrificación conveniente* no puede definirse por un mínimo del carbón consumido por kilómetro de línea, sino que es mucho más compleja: *existencia o no de economías netas en la explotación del ferrocarril ya electrificado*.

c) Si se desea un mínimo que indique la condición de economía, es preciso acudir al tráfico, verdadera variable independiente. Pero todo gráfico, para que sea de general aplicación, debe precisamente ligar las influencias de las pendientes en estos tráficos mínimos que se buscan. Tales gráficos, serán—con ligeras hipótesis restrictivas—de general aplicación, cosa que vimos no sucedía en los de Parodi y Lucia. A esta condición responden los hallados por nosotros, que se publicarán en un próximo artículo.

Francisco JIMÉNEZ ONTIVEROS  
Ingeniero de Caminos

## Nota sobre estudios elásticos de la reacción del terreno

Requeridos por nuestro querido maestro D. J. Eugenio Ribera para prestar nuestra insignificante colaboración en el proyecto para el segundo concurso del dique seco de Cádiz <sup>1</sup>, a principio del año antepasado, creemos pueda tener algún interés, por el momento solamente teórico al carecer aún de comprobación, el estudio hecho, aplicando procedimientos y fórmulas del inolvidable Sr. Zafra, sobre la reacción elástica del terreno, por lo que a continuación exponemos un breve resumen de su desarrollo.

En los casos de dimensiones corrientes de las cimentaciones puede darse por sobradamente satisfactorio un reparto de la reacción del terreno uniforme en toda la superficie de apoyo para cargas centradas, y en los casos de situación excéntrica de la acción resultante, un reparto fundado en la ley de Napier, suponiendo tan grande la rigidez de la losa de cimentación que no sean de temer en ella deformaciones

y que el terreno responda perfectamente a la ley de Hooke, es decir, admitiendo absolutamente su reacción elástica.

Pero puede llegar un momento en que la relación entre el elemento de cimentación y la superficie de apoyo sea tal que no se pueda contar con la rigidez prácticamente absoluta de aquél, en cuyo caso es forzoso estudiar alguna hipótesis que permita comprobar si la más desfavorable para el cálculo es la inmediata de suponer un reparto plano. Y solamente la hipótesis de la elasticidad del terreno nos permite abordarlo con alguna probabilidad de acierto, siempre con más, que no la hipótesis de repartos arbitrarios o discontinuos de esta reacción, que lo mismo pueden resultar muy desfavorables y, por tanto, seguros, como todo lo contrario. Claro que nos encontramos aquí con un hecho contrario; estos estudios son necesarios cuando la superficie de cimentación es muy grande y proporcionalmente a ella aumenta la incertidumbre en la aplicación de la teoría de la elasticidad del terreno, al ser más difícil se

<sup>1</sup> REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS, número 1.º de julio 1926, página 313, artículo del Sr. Ribera sobre este dique.