

tos, homogéneos o mezclados, que puedan adaptarse económicamente a las diversas condiciones y requerimientos de las construcciones en el mar y que reúnan todos una perfecta inmunidad contra la acción destructora de sus aguas.

Mientras tanto, indicaciones parecidas a las que en el presente trabajo han sido en lo posible puntua-

lizadas están sirviendo de base muy razonable en distintas partes para las edificaciones marítimas que se levantan, con la esperanza, no infundada, de que basten a prevenir o, al menos, aminorar grandemente los fracasos provocados en casi todos los países por el empleo de los productos hidráulicos, aun los que mayor confianza venían inspirando.

José NICOLÁU

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

ELECTRIFICACIÓN DE FERROCARRILES

Estudios sobre su conveniencia económica

I

Métodos expeditos para su comprobación

Adelantándome a lo que hoy es una realidad oficial, publiqué el pasado año, en la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS ¹ un extenso trabajo, en que demostraba la necesidad de estudiar la formación de un plan general de electrificación de los ferrocarriles españoles, estableciendo al mismo tiempo un procedimiento general, a la vez que muy expedito, para la determinación, mediante el estudio de su conveniencia económica, de las líneas férreas que debían electrificarse. Su contenido era el resumen de otro trabajo, más detenido, que dificultades varias me impidieron se editara ², donde se fundamentaba el método seguido, y en que se contiene la parte de verdadera aplicación práctica del mismo.

Suponemos que uno de los fines primeros de la Comisión de Electrificación, recientemente nombrada, será la determinación de las líneas férreas en que sea conveniente, económicamente considerada, la electrificación. Esto, que parece tan sencillo, encierra indudables dificultades, no precisamente por la que pueda existir en tal cuestión *técnicamente considerada*, sino en la *elección del procedimiento*. Es sabido, y en mis artículos quedó suficientemente probado, que todo modo expedito de comprobar si una electrificación es o no conveniente, económicamente considerada, tiene que ser forzosamente aproximado. Todos los procedimientos de tal carácter son verdaderamente eliminatorios, de primera aproximación. Pero es precisamente esta eliminación la que es difícil de hacer de un modo justo y equitativo, encerrando estas dos preguntas: ¿Hasta dónde se extenderá la electrificación? ¿Cuál será—en el terreno de un plan amplio de electrificación—la línea que separe los ferrocarriles electrificables y los no electrificables desde el punto de vista económico?

Evidentemente, todo dependerá de la exactitud del procedimiento de comprobación seguido. Pero éstos no han de perder su carácter de sencillez y fácil aplicación, necesario en todo trabajo preparatorio. Examinar y compulsar estas dos cuestiones casi antagónicas (exactitud-expedición), al objeto de faci-

tar—si ello es posible—los trabajos de la Comisión citada, es el fundamento de todo lo que sigue.

* * *

Una electrificación introduce, al primer examen que se hace de esta cuestión, ciertas economías, brutas si sólo se tienen en cuenta los gastos—y, por tanto, su diferencia—de explotación en ambos sistemas de tracción. Netas, si, como es lógico, se ponen en presencia los gastos de intereses y amortización del capital necesario para la electrificación. Esta comienza a ser conveniente en el momento que hay economías netas. Todos los procedimientos expeditos se reducen, por tanto, a encontrar rápidamente la existencia o no de estas economías netas. Las economías netas iguales a cero establecerán una condición de mínima economía. Yo he llamado *ecuación de mínima economía* a la siguiente

$$G_v - G_e - C = 0 \quad [1]$$

donde G_v son los gastos totales de explotación por vapor, G_e ídem por electricidad, y C las cargas que se derivan del capital necesario para efectuar la electrificación. De aquí nacen todos los procedimientos de comprobación de la conveniencia económica. Hasta mis trabajos del pasado año, todos los procedimientos se basaban en hallar $G_v - G_e$ solamente tomando la economía del combustible consumido en vapor con la energía necesaria en tracción eléctrica, principalmente, y algunos gastos de material y tracción de un modo secundario. Así, fórmulas de Parodi, Balatroni, Lucia, entre los más significados. Ya Parodi, en la segunda exposición de su fórmula ¹ que después examinamos, insiste en «los gastos de entretenimiento y reparación del material fijo», y Lucia, en su segunda ² introduce un coeficiente para la relación entre la economía total de la electrificación y la debida sólo a la energía de la tracción. Yo demostré, con anterioridad, que no tener en cuenta los gastos de material y tracción *distintos* del combustible era una causa de error inadmisibles, pues dicha economía llegaba hasta el 55 por 100 de la debida a la tracción, término medio, pudiendo determinar por sí sola la conveniencia económica.

¹ *Bulletin de l'Union Internationale des Chemins de Fer*, abril 1927.

² *Ingeniería y Construcción*, abril 1928. Véanse sus primeras fórmulas en su folleto *Estudios económicos sobre electrificación de F. C.*

¹ Números de 15 febrero, 1.º y 15 de marzo y 1.º de abril de 1927, páginas 70, 89, 111 y 139.

² Este trabajo fué presentado al concurso de 1925-1927 del Instituto de Ingenieros Civiles, y premiado por el mismo.

ca de una electrificación, sumada su acción a la del combustible. La generalidad del procedimiento expuesto y seguido por mí estriba precisamente en la introducción de este concepto, atacando directamente esta dificultad y añadiendo indudablemente bastante exactitud a los métodos anteriores. La comprobación de tal condición y la demostración de que no por ello pierde nuestro procedimiento sencillez ni rapidez en la aplicación¹ exige la comparación, sin el menor asomo de controversia, de los siguientes procedimientos:

PROCEDIMIENTO DE M. PARODI.

Parte, como hemos dicho, de igualar las economías obtenidas con la electrificación a las cargas del capital; estas economías obtenidas sólo por los conceptos de combustible y conservación de máquinas, principalmente. Deduce en seguida la *cantidad de carbón límite económica*; es decir, la cantidad de carbón que se precisa consumir por kilómetro de línea para que la electrificación sea económica. Obtiene así:

$$Q = \frac{Pr}{100} \frac{1}{C[1 + 0,32(1 + \epsilon)] + 3,57(1 + \epsilon) - \frac{1000}{\lambda} P} \quad [2]$$

toneladas de carbón anuales por km.

C = precio de la tonelada de carbón sobre tender.
 P = coste de la electrificación por kilómetro de línea, teniendo solamente en cuenta el material fijo.
 r = %, tanto por ciento del capital por interés y amortización, aumentado en una unidad.
 λ = número de kilogramos de carbón que pueden ser reemplazados por 1 kw-hora en las bornas de las subestaciones.
 ϕ = precio del kw-hora a la entrada de las subestaciones.

ϵ = suplemento de economía que es preciso suponer en las líneas de fuertes pendientes.

El suplemento de 1 en r es para tener en cuenta los gastos de entretenimiento y conservación del material fijo.

Esta fórmula nos sugiere muchos inconvenientes, que no se ocultaron a su ilustre autor:

a) Comienza por suponer que las economías varían linealmente con el curso del carbón, economías por conservación y reparación de locomotoras. Además, sólo basado en resultados de explotación limitada², supone dichas economías: $0,10 + 0,009C$.

b) El suplemento por líneas de fuertes pendientes $1 + \epsilon$ es bastante arbitrario, y basado en resultados de Explotación de ferrocarriles extranjeros, italianos, en las líneas de montaña.

c) Supone el gasto de carbón por locomotora-kilómetro igual a 28 kilogramos. Esto, evidentemente, no se cumple en infinidad de líneas, a las cuales no podrá, por tanto, aplicarse esta fórmula.

d) No estudia directamente y con el detalle suficiente los gastos de material y tracción distintos del combustible: gastos de conservación de la locomotora,

del personal de conducción, de depósitos y talleres, de alimentación de agua, de engrase de locomotoras, que son las características reales de la tracción, ni los gastos de conservación de las líneas e instalaciones eléctricas.

e) Y, por último, en la fórmula no aparecen *directamente* representados: ni la pendiente, ni la longitud, ni el tráfico, elementos esenciales de toda línea. Se me dirá que su resumen y su traducción es el consumo de carbón y energía eléctrica; pero esto no es bastante, porque al no figurar en la fórmula dichos elementos fundamentales, no se puede apreciar su influencia, ni la de sus variaciones. Y respecto a la orientación general del procedimiento, también es preciso hacer observar que determinar un consumo mínimo de carbón es encontrar solamente una condición de economía, pero no su cuantía ni su importancia. Esto tiene el serio inconveniente de que puede mantener la indecisión en aquellas líneas en que exista verdadera duda acerca de la conveniencia económica de su electrificación.

El procedimiento, en suma, es poco preciso. No permite, rápidamente, y menos gráficamente, hallar las economías netas, ni las brutas. Respecto a su representación gráfica, sólo puede disponerse de *un solo* gráfico, que ligue el consumo límite de carbón y el precio de la tonelada de carbón sobre tender. Pero como este gráfico es preciso basarlo en un coste kilométrico de la electrificación, y evidentemente este coste no es independiente de los costes de las locomoto-

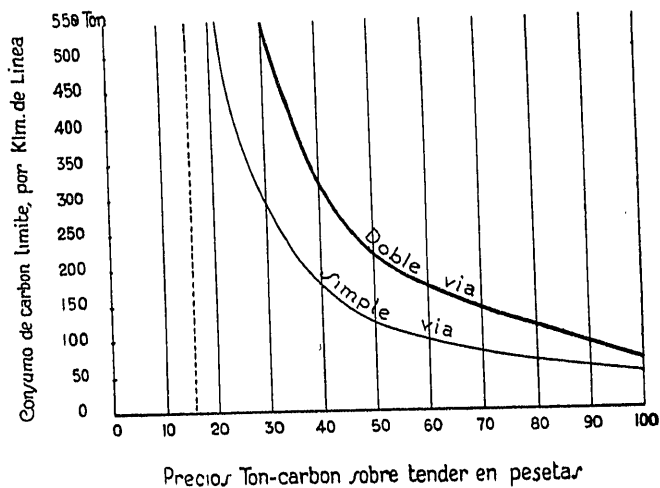


Fig. 1.ª Método de M. Parodi (Precio del kw-hora en la entrada de las subestaciones, 0,08 pesetas).

ras, como supone M. Parodi, pues unas veces se cumplirá esta condición y otras no¹, resulta que en definitiva el coste por kilómetro de línea debe variar con el tráfico, última y verdadera variable independiente a la que siempre es necesario llegar, como veremos sucede en nuestro procedimiento.

Aplicaremos, no obstante, esta fórmula a los ferrocarriles españoles cuyo coste $P = 75\,000$ ptas., cifra resultante de un modo aproximado de las electrifica-

¹ Esto precisamente se ha opuesto a nuestro procedimiento, pero quedará demostrado más adelante todo lo contrario.

² Línea electrificada de París-Juvisy, y de vapor Luxembourg-Sceaux-Limours.

¹ M. Parodi supone, en efecto, que en la comparación que se hace de los gastos de explotación de ambos sistemas de tracción no se deben tener en cuenta las procedentes de la compra de las locomotoras, lo que supone que o el ferrocarril no tiene locomotora alguna de vapor utilizable, o que pueden aprovecharse íntegramente, y en otro lugar tantas de vapor que igualen al coste de las eléctricas. Pero esto es muy discutible.

ciones del Norte en curso de ejecución, material, tractor excluido, simple vía, y $P = 140\,000$ ptas. para líneas de doble vía. En la fórmula [2] pueden suponerse como variables independientes Q , C , ϕ , lo que nos daría los valores de una cualquiera de ellas en función de las otras dos, resultando así un gráfico parecido al obtenido por Lucia. Pero si, como es lógico, la Comisión supone un precio medio constante para el kw-hora ϕ medido en la entrada de las subestaciones, entonces tendremos un gráfico que ligue $Q =$ (toneladas límites de carbón) y $C =$ (precio de la tonelada carbón sobre ténder). Si los valores de los demás parámetros son: $1 + \epsilon = 1,25$ (líneas de fuertes pendientes, caso el más frecuente en los ferrocarriles españoles), $\phi = 0,08$, $r = 8$, $\lambda = 3$, se tiene:

$$Q = \frac{6\,000}{1,4 \cdot C - 21,1} \text{ simple vía} \quad [3]$$

$$Q = \frac{11\,200}{1,4 \cdot C - 21,1} \text{ doble vía} \quad [4]$$

Haciendo variar C , precio de la tonelada de carbón sobre ténder, se obtienen los valores del consumo límite de carbón, encontrando así el gráfico de la fig. 1.^a Sobre el valor relativo, de poca exactitud, de este gráfico, trataremos después.

PROCEDIMIENTO DE LUCIA.

El significado fundamental—nos referimos en todo lo que sigue al expuesto en *Ingeniería y Construcción*, abril 1928—es idéntico al de Parodi: encontrar la cantidad de carbón límite económica que un ferrocarril explotado por vapor debe consumir por kilómetro para que su electrificación sea conveniente económicamente. De aquí que fundamentalmente tenga, en nuestro modesto criterio, los mismos inconvenientes que el de M. Parodi. (A este respecto juzgamos muy superior la orientación que siguió en sus anteriores trabajos)¹. Su exposición es, en cambio, mucho más racional. Obtiene la fórmula siguiente:

Cantidad carbón límite:

$$Q = \frac{t \cdot i \cdot E}{100 \cdot a \left(t \cdot c - \frac{1\,000}{r} \cdot h \right)} \text{ Ton/car. km año} \quad [5]$$

donde $t =$ relación entre tonelada-kilómetro bruta por vapor y electricidad $= 1,10$; $i =$ % de amortización e interés del capital; $E =$ coste total de electrificación (no parcial, reducida al material fijo, como M. Parodi); $a =$ relación entre las economías anuales conseguidas con la electrificación total a la correspondiente por la energía de la tracción; $c =$ precio de la tonelada de carbón sobre ténder, en pesetas; $r =$ kilogramos de carbón sustituidos por 1 kw-h. en las subestaciones, para igual trabajo en llantas, $h =$ precio del kw-h en la entrada de las subestaciones. Sustituyendo: $t = 1,10$, $i = 8$, $a = 1,50$, $r = 3$ y $E = 170\,000 \cdot F = 320\,000$ pesetas-kilómetro, para simple y doble vía, obtiene estas dos fórmulas expeditas:

$$Q = \frac{30\,000}{3,30 \cdot c - 1\,000h} \text{ (simple vía)} \quad [6]$$

$$Q = \frac{56\,000}{3,30 \cdot c - 1\,000h} \text{ (doble vía)}$$

¹ Folleto antes citado.

Estas fórmulas, que ligan tres variables independientes, pueden dar lugar a gráficos que contengan juntamente las tres. Pero si adoptamos $h = 0,08$ ptas., término medio del coste de la energía en España en las condiciones dichas, se obtendrá un gráfico parecido al que hemos encontrado antes de M. Parodi, pero de valores distintos.

Como anteriormente, nos permitimos objetar lo siguiente:

1.º Para la obtención de la fórmula se ha supuesto que la economía producida por la electrificación en los gastos de explotación, distintos del combustible, es proporcional a éste. Sin duda ello es muy aproximado, pero es más racional encontrar, directamente, y con el auxilio que la corta experimentación permite en esta materia, dichas economías, en función de los gastos actuales de la tracción por vapor. Ello tendrá la ventaja inapreciable de que la fórmula obtenida reflejará siempre y directamente las características principales de la explotación del ferrocarril que se intenta electrificar. El modo de explotación varía mucho de un ferrocarril a otro, y, por tanto, las economías que con la electrificación se han de obtener. Poner, pues, «en presencia» en la fórmula estas economías lo consideramos preciso, ya que da al procedimiento mayor precisión, y una gran generalidad. Y esto es lo que hemos procurado hacer en nuestro procedimiento.

2.º Más importante aún es lo siguiente, aplicable por igual a los métodos de Lucia y Parodi. Ambos, *para ser expeditos*, necesitan suponer un coste de electrificación constante por kilómetro de línea. De lo contrario se necesita recurrir a las fórmulas. Esto dice que los gráficos obtenidos no son aplicables a cualquier ferrocarril, como se verá inmediatamente. Suponer, como hace M. Parodi, que la electrificación en simple vía cuesta siempre 250.000 francos, no es exacto, aun cuando aquí el error no será grande, por suponer que se trata sólo del material fijo. Y fijar, como hace Lucia, un coste de 170 000 ptas. para líneas de simple vía, y 320 000 ptas. para las de doble vía, precios medios del Norte, no es exacto, porque el coste de electrificación varía con el tráfico y éste es muy distinto de unos ferrocarriles a otros. Por eso, según los gráficos de Lucia, sólo en España son electrificables las líneas de tráfico parecido a las del Norte, lo que tampoco es exacto, o, por lo menos, no es modo natural de hacer la comprobación¹ de la conveniencia económica. Esta depende, evidentemente, del precio del carbón y del kw-hora; pero también del coste de electrificación que arrastra consigo tan elevadas cargas, y que, a su vez, depende intrínsecamente del tráfico. He aquí la principal característica de la tracción, y debe aparecer en toda fórmula que estudie estas cuestiones.

3.º Tampoco en ambos procedimientos figuran, directamente, las pendientes de las líneas. No basta con decir que el consumo de energía depende en gran parte de las pendientes. Hay, como para el tráfico, que ponerlas en presencia en las fórmulas, que, en definitiva, deben contener estas dos esenciales características del tráfico ferroviario.

Para reflejar exactamente estas observaciones pongamos varios ejemplos:

¹ Conste que hablamos sólo de los gráficos, que las fórmulas son más aplicables, aun con las demás observaciones hechas en este lugar, que las rodean, a nuestro juicio, de poca exactitud. El método pierde evidentemente su carácter de expedito, aunque conserve todo el interés que siempre distingue a los trabajos del Sr. Lucia.

Línea de Andaluces:

Según las estadísticas de la Compañía, el precio c de la tonelada de carbón sobre ténider es = 50 pesetas y suponiendo el del kw-hora de 0,08 pesetas, es decir

$$\begin{aligned} c &= 50 \text{ pesetas.} \\ h &= 0,08 \end{aligned}$$

se tiene:

Consumo lineal límite de carbón	{ Parodi. 122	} Ton-carbón por km (simple vía) y año
	{ Lucia. 376	
Ahora bien, el consumo actual medio en dicha Compañía, es	97	

de donde resulta esta consecuencia: *Ninguna línea de Andaluces debe electrificarse, desde el punto de vista de su economía, aplicando los gráficos de Parodi y Lucia.* El límite de consumo señalado en uno y otro procedimiento es totalmente diferente, y varias veces mayor que el consumo actual, especialmente el último. Pero esto no es exacto, según queda dicho, debiendo variar para cada línea el coste de electrificación, no siendo entonces aplicables los gráficos. Del mismo modo se demostraría que a no ser las líneas de gran tráfico del Norte y M. Z. A., ninguna otra es electrificable, según dichos gráficos.

Línea de M. Z. O. V.:

Se tiene de idéntica manera:

$c = 70$	} Parodi. 77	} Ton-carbón por km y año	
$h = 0,08$			} Lucia. 200

de donde resulta que la electrificación es conveniente, según Parodi, y todo lo contrario, según Lucia.

Para poner de acuerdo estos resultados antagónicos, repétemos, es necesario variar el coste de electrificación, y, por tanto, desaparece la eficacia de los gráficos.

* * *

Nosotros hemos intentado que en nuestro procedimiento se reflejen la influencia de las características principales del tráfico ferroviario: tráfico y pendiente de las líneas. De este modo, para cualquier línea se pondrán en juego sus verdaderas características, y en cualquier momento se podrá comprobar la electrificación, sea por la fórmula, que más adelante expondremos, sea por su traducción en gráficos, que conservan toda generalidad sin perder su sencillez, porque el coste de la electrificación viene dado, aunque sea de un modo aproximado (y del mismo orden de aproximación, o acaso mayor que los anteriores procedimientos), en función del tráfico y pendiente de la línea, y esto será el contenido del siguiente artículo.

Francisco JIMÉNEZ ONTIVEROS
Ingeniero de Caminos.

Determinación estática experimental de los sistemas hiperestáticos

El profesor alemán Chr. Rieckhof ha ideado un aparato, al que llama «Nupubest», que permite resolver por métodos de estática gráfica los sistemas estáticamente indeterminados.

Hemos hecho algunas aplicaciones de este procedimiento y, como hemos obtenido resultados halagüeños, nos proponemos dar a conocer en estas líneas algunas ideas sobre el mismo.

Consiste, en esencia, en obtener una amplificación de la elástica del sistema sometido a la carga que se trata de estudiar, y después, teniendo en cuenta que los puntos de inflexión de dicha curva son puntos de momento nulo, considerar que cada uno de dichos puntos es una articulación, descomponiéndose así el sistema hiperestático en una cadena de sistemas articulados en dichos puntos y estáticamente determinados, que se calculan con la ayuda de la estática elemental.

Para ello se reproduce con el aparato, a escala reducida, la estructura a estudiar. Esta reproducción se hace en forma tal que la relación de momentos de inercia de las barras sea la misma que en la estructura que se estudia, y que las condiciones de sustentación y de enlace en los nudos sean también las mismas. Después se deforma la estructura bajo la acción de una fuerza única, de dirección y punto de aplicación dados y magnitud indeterminada, y sobre

esta elástica se hace la determinación de los elementos mecánicos.

El aparato «Nupubest» consiste sencillamente en una serie de piezas que permitan la reproducción de la estructura a estudiar con las mismas condiciones de sustentación y enlace en los nudos que va a tener en la realidad. No podemos entrar en el detalle de la descripción de cada una de las piezas de que se compone el aparato, y nos limitaremos a decir que las barras se reproducen con flejes de acero de unos 10 mm de ancho y unas décimas de milímetro de grueso, combinadas en forma tal que la relación de los momentos de inercia de las secciones de los flejes sea la misma que la que va a existir en realidad entre las secciones que se estudien. Hay piezas para obtener sustentaciones de libre deslizamiento, de rótula y empotradas; enlaces rígidos de barras que se encuentren formando un ángulo cualquiera y un dispositivo para la aplicación de la fuerza que, como hemos dicho, es de magnitud indeterminada. Como el procedimiento exige que se trabaje siempre con una fuerza aislada, el profesor Rieckhof ha calculado una tabla con auxilio de la cual, y para los efectos del procedimiento, puede sustituirse el efecto de diversas hipótesis de repartición de sobrecargas por una carga aislada, cuyos elementos se calculan en función de los de la carga repartida. Combinando