

La explotación ferroviaria y la electrificación de ferrocarriles¹

III y ÚLTIMO

Carácter de los gastos de explotación de un ferrocarril electrificado.—Comparación de la dinámica de los gastos en ambos sistemas de tracción.—Conveniencia económica de una electrificación

En los dos artículos anteriores hemos deducido las consecuencias siguientes: cómo los gastos de explotación de un ferrocarril es preciso reducirlos a las relaciones que los unen con un grado de actividad variable, si se quiere hacer un estudio que se sujete a la ciencia de los gastos industriales; que el análisis de estas relaciones conduce al hecho simple, pero fundamental, de que los gastos de explotación son prácticamente constantes—en su mayor parte—o independientes de las variaciones del tráfico total, para el período considerado, 1923-1927; que este hecho fundamental conduce, a su vez, a que las Compañías pueden—y deben—elevar el tráfico mientras esta condición no varíe, mejorando así su rendimiento económico, concepto que no es precisamente el de su coeficiente de explotación; que el límite del aumento del tráfico es el «tráfico mínimo económico», a partir del cual la curva de gastos se modifica, siendo necesario el análisis de otra nueva curva, según las reglas anteriores. Además, el tráfico mínimo económico, que hasta ahora sólo pretendemos fijarlo por vía de gastos, se alcanza por la adopción de medidas que permitan obtener economías en la explotación ferroviaria. Y estas medidas son: unas ordinarias, y otras de mayor consideración. Entre éstas figura la electrificación de ferrocarriles. Para encontrar su influencia en los gastos de explotación es preciso analizar su carácter en un ferrocarril electrificado.

Esta cuestión veremos conduce al problema de la conveniencia económica de una electrificación, problema que por su índole esencialmente económica es, a la hora presente, el de mayor interés en el más general de la electrificación de ferrocarriles. En todos mis modestos trabajos, aparecidos la mayor parte en estas columnas, me he esforzado por demostrarlo así, creyendo necesario insistir ahora, aunque ligeramente, en el momento en que está planteada una intensa electrificación de nuestras líneas férreas. Como dice A. Walther, el problema técnico de la tracción eléctrica pertenece por entero a la historia de ésta, a pesar de su gran complejidad. La elección de sistema de corriente, de tensión; la unificación del material, como cuestiones generales, y las más particulares de la transmisión de la energía, líneas de contacto, subestaciones, material eléctrico, protección de líneas telegráficas y telefónicas, etc., están hoy día prácticamente resueltas, aunque sujetas—naturalmente—a los continuos progresos de toda industria. Por ejemplo, la elección de sistema de corriente, el más fundamental en todo programa extenso de electrificación, está limitada a la corriente continua a alta tensión (1 500-3 000 voltios), o a la monofásica, cuyas ventajas las distancian del sistema

de corriente trifásica, ya que los sistemas de corriente monofásica y monocontinua no cuentan con precedentes suficientes para tenerlos en cuenta en un programa general de electrificación. La superioridad del sistema de corriente continua sobre el monofásico sólo estriba en una condición de valor relativo: que no existen redes de distribución monofásica, impidiendo su utilización directa, siendo así necesaria la transformación de la corriente generalizada: la trifásica a alta tensión. En el momento en que pudieran construirse grandes centrales hidráulicas destinadas exclusivamente a alimentar los ferrocarriles electrificados, cesaría por completo el valor o la superioridad de la corriente continua, pues aquellas centrales podrían ser monofásicas. En un programa de electrificación tan intenso como el que propone la Comisión que se nombró en 1928, o el más modesto que con fecha anterior nosotros propusimos en la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS, cabría estudiar esta solución. Esto quiere decir que prácticamente, mejor técnicamente, los sistemas continuo y monofásico son equivalentes. No existe problema, pues, ni aun en la elección de sistema, que es la cuestión más principal¹. Es sólo al llevar a la realidad las electrificaciones cuando se presenta el problema fundamental, el de la economía de la electrificación, pues sin negar que algunas líneas son electrificables sólo por las necesidades técnicas de la explotación (Pajares, Bobadilla-Málaga, etc.), cuando se analiza la posibilidad de electrificar varios miles de kilómetros (a 5 096 km ascienden las líneas en que, según la Comisión citada, se debe estudiar detalladamente la conveniencia de su electrificación, o sea el «programa implícito» que ella propone), sólo existe de una manera primordial la cuestión de su conveniencia económica.

De diversos modos puede enfocarse el estudio de la conveniencia económica de una electrificación²; pero el análisis de los gastos de explotación que aquí hacemos, en función del grado de actividad, nos permite la deducción de consecuencias importantes, en orden a este problema.

Supongamos un ferrocarril explotado por vapor y tal que sus características estén reflejadas en el

¹ Hablamos, no se olvide, de un modo general, no absoluto. Además, consideramos que en España es cosa resuelta hace tiempo, por la necesidad de proceder con miras a la unificación, la elección del sistema de corriente continua a alta tensión. La corriente monofásica tenía que reunir muchas y más importantes ventajas que las señaladas sobre la continua, para pensar hoy en día en hacer electrificaciones de ferrocarriles españoles con dicha corriente monofásica. Es el mismo argumento que tienen otros países—Suiza, por ejemplo—para continuar sus electrificaciones con corriente monofásica. Y algún eminente ingeniero me decía en Ginebra, el pasado mes, que, a pesar de que para Suiza la corriente monofásica tiene más ventaja que la continua, de haber comenzado por ésta habría necesariamente que haber sostenido el mismo sistema.

Este artículo estaba entregado en la redacción de la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS con anterioridad a la publicación del de D. Luis Sanchez Cuervo, donde analiza esta cuestión con todo detalle, llegando a la misma conclusión que esta nota.

² Véanse los artículos citados aparecidos en esta REVISTA.

¹ Véanse los números de 1.º y 15 de noviembre de 1929, páginas 208 y 228.

gráfico núm. 1. En él se distinguirán, como se ha visto en el artículo anterior, dos zonas: una de constancia con relación al grado de actividad; otra de variabilidad. Los conceptos diversos que integran los gastos totales de la explotación—mejor los propiamente dichos—serán constantes o variables con

penden todos del grado de actividad, y serán examinados en seguida.

Los gastos de explotación correspondientes a la conservación de las instalaciones eléctricas vendrán representados por una recta paralela al eje de abscisas. Y los correspondientes a la anualidad de interés y

amortización del capital invertido en la electrificación, por otra recta análoga, más alejada, por ser de mayor cuantía estos gastos, aunque no entremos ahora en su determinación. La recta CC' limita, pues, todos los gastos de explotación, que en el ferrocarril electrificado son independientes del grado de actividad.

Todos los gastos restantes son dependientes del grado de actividad: conservación del material tractor; personal de tracción; gastos de depósitos, personal de depósitos, trenes, locomotoras; engrase de vehículos y material tractor, y, sobre todo, consumo de energía eléctrica. El conjunto de estos gastos vendrá representado por una recta ¹ que partirá de C (grado de actividad cero), y cortará a la ordenada del tráfico

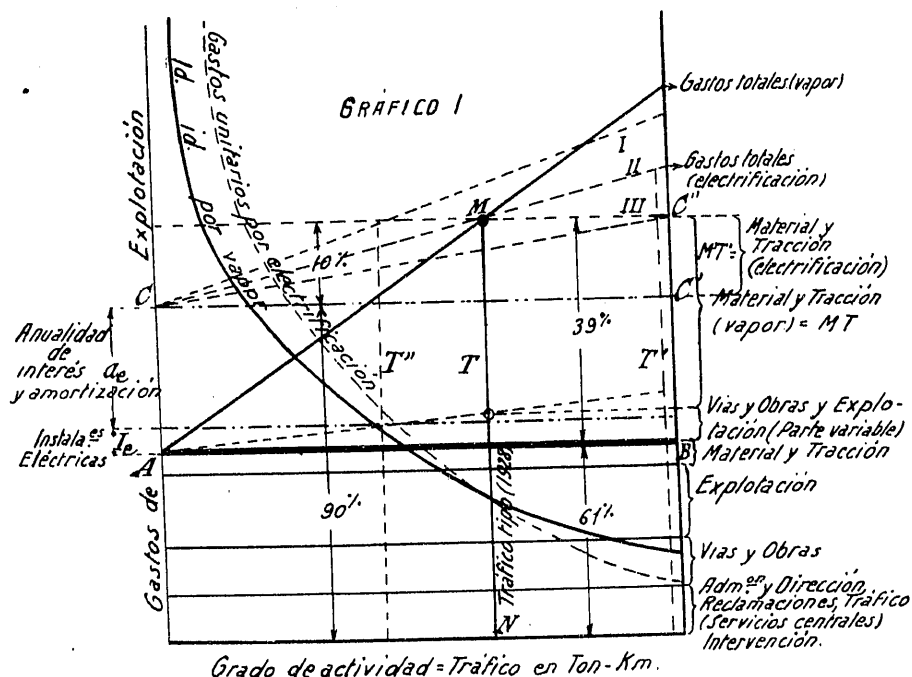
tipo por encima de M , en M , o por bajo de M (posiciones I, II y III). Estos gastos no son otros que los de Material y Tracción del ferrocarril electrificado. La zona, pues, de variabilidad se reduce en realidad a los gastos de Material y Tracción, tanto con vapor como con electricidad. Esta propiedad forma la base de la comparación entre ambos sistemas y de la comprobación de la conveniencia económica de una electrificación.

Por otra parte, formando las curvas de los gastos unitarios, como se hizo en el artículo anterior, para el punto M y la posición II, tenemos las consecuencias siguientes ²:

1.^a A la parte de gastos constantes en la tracción por vapor hay que añadir los gastos, constantes también, con relación al grado de actividad, de conservación de las instalaciones eléctricas y de la anualidad de interés y amortización del capital necesario para el establecimiento eléctrico. Los primeros son de menor importancia que la anualidad a_0 . Cualquiera que sea el modo de determinarla, parece lógico se expresen por una anualidad, también, del coste de su establecimiento, anualidad de conservación que tiene estos valores muy aproximados, un año con otro, en las principales electrificaciones: Promedio de los ferrocarriles italianos, 3,50 por 100 (líneas de transmisión y distribución); ídem suizos, 1,80 por 100; ídem Chicago-M. St.-Paul, 1,21 por 100 ídem; Pajares (España), 2,10 por 100 ídem, etc., todos por 100 de su coste. En cuanto a las subestaciones, dicho tanto por ciento es, aproximadamente, 0,75 por 100 de su coste. Cualquiera que sea el valor, y vistas las di-

¹ No se olvide la hipótesis hecha en el artículo anterior sobre este punto.

² La escala de los gastos variables no guarda relación con la de los constantes, para mayor claridad en la figura.



relación al grado de actividad, en las proporciones aproximadas señaladas en el gráfico. El tráfico, o grado de actividad, se supone es el correspondiente al año 1928, por ejemplo, sin que por ahora haya necesidad de fijar su cuantía.

Sea este ferrocarril electrificado, parcial o totalmente, y veamos la variación que sufre el gráfico con el sistema de tracción eléctrica. Los gastos de Administración y Dirección, Reclamaciones, Intervención, Tráfico (servicios centrales), permanecen invariables después de efectuada la electrificación. Vía y Obras: quizá sería algo menor en el ferrocarril electrificado, por la influencia distinta de las locomotoras respectivas, por consecuencia de la diferencia de peso por eje motor en unas que en otras, por su movimiento en la vía, por los efectos del humo sobre las obras de fábrica y metálicas, etc. Tampoco son necesarias las instalaciones de toma de agua y carbón ¹. Pero, en conjunto, podemos suponer que los gastos de Vía y Obras son iguales, después de la electrificación, compensando aquellas diferencias suprimiendo la parte variable de este gasto con el grado de actividad (2,4 por 100 en el gráfico). Explotación: la parte que era constante con la explotación por vapor sigue sin variación una vez electrificado el ferrocarril (25 por 100). Lo mismo podemos decir de Material y Tracción (11,9 por 100 del gráfico). Existen, además, otros gastos que dependen sólo de la implantación de la electrificación y constantes con relación al grado de actividad. Tales son: conservación de las instalaciones eléctricas (líneas, subestaciones, etc.) y anualidad correspondiente a la amortización y al interés del capital del establecimiento de la electrificación, I_e y A_e . Los demás gastos que pueden citarse de-

¹ Los gastos de explotación de estas instalaciones son insignificantes.

ferencias poco importantes y fácilmente explicables¹, su valor no es elevado al lado de la anualidad de amortización e interés a_c . En los estudios económicos de electrificaciones se suele tomar del 8 al 10 por 100 del capital del establecimiento eléctrico. Ahora bien, este capital es muy elevado, pues si tomamos un promedio del coste actual de líneas de ancho normal, vía sencilla, de 150 000 pesetas para el tráfico medio de las dichas líneas en España, tendríamos para un programa de electrificación de 5 000 km: 750 millones de pesetas, con anualidad $a_c = 75$ millones, mientras que la I_c antes definida, sin tener en cuenta el coste de las líneas de alta tensión, no sería superior a $I_c = 5$ millones de pesetas, es decir, quince veces menor. La proporción entre ambos gastos queda así determinada, como también su cuantía. Y cualquiera que sea el modo de su determinación, lo importante es fijar que entre ambas suponen *un gasto constante muy elevado*, incluso para el grado de actividad de valor cero. Así como en la tracción por vapor los gastos constantes eran el 61 por 100, una vez electrificado el ferrocarril estos gastos constantes son más elevados, al par que la proporción de las variables disminuye. Un 90 por 100 y 10 por 100 son valores aproximados que podemos fijar por ahora—y se verá más lejos que con razón—como expresión de las proporciones con que entran en la estructura de los gastos de explotación de un ferrocarril electrificado.

2.^a Si se recuerda lo que dijimos en el artículo anterior, se ve que la tracción eléctrica es más perfecta que la tracción por vapor, porque en aquella los gastos variables disminuyen más rápidamente o, mejor, aumentan en menor proporción a medida que aumenta el tráfico en la línea. Naturalmente, hay una zona propia de la tracción por vapor y otra propia de la tracción eléctrica. Mientras el tráfico no alcanza el valor correspondiente al punto M , la tracción por vapor es más ventajosa que la tracción eléctrica. El punto M es, pues, el límite inferior del tráfico necesario para que la electrificación sea económicamente aconsejable. Y, además, el punto M señala el *gasto de explotación a partir del cual la electrificación se impone*.

3.^a Un mínimo del tráfico T y un máximo de los gastos de explotación: tales son los factores que entran en la comprobación de la conveniencia económica de una electrificación, problema el más importante, según hemos dicho, en la electrificación de ferrocarriles. He aquí la consecuencia fundamental, ya sabida, pero que este procedimiento pone de relieve mejor que otro alguno: *para que una electrificación sea económicamente aconsejable es preciso que el*

tráfico en la línea alcance un valor determinado. La electrificación *acelerada*, es decir, sin que la preceda un estudio detenido de la línea a electrificar, será el mayor error que pueda cometerse*. Este tráfico mínimo económico, llamado así por mí en los trabajos aparecidos en 1927 y 28 en la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS, puede encontrarse con bastante exactitud por este procedimiento, como demostraremos pronto. Nosotros ya lo habíamos determinado partiendo de la ecuación de mínima economía:

$$G_v - G_e - A_e = 0$$

en que todos los términos conseguimos ponerlos en función del tráfico, como única variable independiente, obteniendo así la condición de «mínima economía» de una electrificación. Ambos procedimientos, gráfico aquél y analítico éste, se complementan, y son la base de la determinación «in extenso» del problema que nos ocupa.

4.^a Si obtenemos las curvas de los gastos unitarios, se ve también perfectamente que la electrificación sólo es conveniente (gráfico núm. 1) a partir de un valor determinado del tráfico T , en que los gastos unitarios por electrificación comienzan a ser inferiores a los correspondientes por vapor. Antes, la electrificación es totalmente contraproducente.

5.^a Antes del punto M , para igual gasto MN , se tienen tráficos inferiores a T . Resultaría, pues, que los gastos efectuados en la electrificación no fueron (posición I, tráfico T') suficientes a producir tráficos superiores a T , correspondientes al año 1928 explotando el ferrocarril por vapor. En cambio, posición III, para un mismo gasto de explotación MN se puede obtener un tráfico mayor a T , el T' . Conduce, pues, la electrificación, en los casos en que es conveniente, o sea en aquellos en que las economías obtenidas con la electrificación permiten llegar a rectas límites de gastos como CC'' , posición III, a obtener tráficos superiores a igualdad de gastos que si el ferrocarril fuera explotado por vapor. Es decir, llegamos así a la obtención del tráfico mínimo económico por la vía de gastos, objeto que fué del artículo anterior.

6.^a Para obtener el gráfico núm. 1 sólo nos falta encontrar el valor de la parte variable de gastos con el grado de actividad, es decir, las rectas I, II, III, etc. Como operamos sobre un ferrocarril actualmente explotado por vapor, podemos encontrar los gastos correspondientes a la electrificación en función de aquéllos. Ya se vió antes que la parte de los gastos variables en la tracción eléctrica se reducía a los gastos de Material y Tracción. Esta consecuencia importante simplifica el problema.

Estos gastos son:

- C_v = Combustible o energía eléctrica necesaria para la tracción.
- a = Personal de tracción, de depósitos y talleres, de trenes.
- b = Gastos diversos de depósitos y otros.
- c = Conducción de máquinas.
- d = Consumo de máquinas.
- e = Conservación del material.

Para encontrar los valores que corresponden a la tracción eléctrica tenemos que referirnos a nuestro

¹ Las diferencias entre los ferrocarriles italianos y los demás se explican por la necesidad en los primeros de la doble línea de contacto. La diferencia entre los costos de la corriente monofásica y continua se explica por la mayor protección que se necesita en el primero, de las líneas telegráficas y telefónicas. Por último, el elevado por ciento del Pajares es debido al comienzo de la electrificación y sus propias dificultades.

² Este valor viene dado, aproximadamente, por $L(0,025 K + 0,0075 \frac{K'}{50})$, donde L es la longitud a electrificar, K el costo por kilómetro de las líneas de contacto y K' el costo de una subestación de 1 000 kw, todo para corriente continua a 1 500 voltios, tomando estos valores: $L = 5 000$ km, $K = 35 000$ pesetas, $K' = 600 000$ pesetas. (Véase nuestro artículo de la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS, año 1927, núm. 2 470, pág. 91.)

* A la hora presente se tiende por la Superioridad a efectuar las electrificaciones de un modo paulatino en aquellas líneas en que la conveniencia parece no ofrecer dudas.

método general, expuesto en la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS, números citados de 1927-1928. Hemos distinguido allí líneas de pendiente débil (hasta 7 mm) y líneas de pendiente fuerte (superior a 7). El promedio de la pendiente, en los ferrocarriles en que la Comisión propone la electrificación, es de 8 por 100, aproximadamente. Por tanto, al estudiar la conveniencia económica de la electrificación del conjunto de dicho programa, partiremos de este valor medio y aproximado de su pendiente característica, adoptando esta denominación o, mejor, expresión de la pendiente. De este modo, si C_e es el gasto de energía eléctrica necesaria para la tracción, I la pendiente característica, r = resistencia del tren en kg/ton, valor medio de horizontal y curvas, g = precio del kilogramo de carbón sobre ténder, g' = precio del kilovatio-hora en la entrada de las subestaciones, ρ = rendimiento de la locomotora eléctrica de las llantas al pantógrafo, β = rendimiento del sistema de distribución, T = tráfico tipo de la línea que se estudia, C_L = coste de las líneas eléctricas, C_S = ídem subestaciones, se tiene de un modo general, siendo λ el coste de Material y Tracción electrificada la línea, sin el coste de la energía:

$$C_e = \frac{9,81}{7200} [I + r] \frac{1}{\beta \rho} T g'$$

$$C_v = 0,006 [I + r] T g$$

$$\lambda = T[0,5a + 0,25b + 0,45c + d + 0,35e]$$

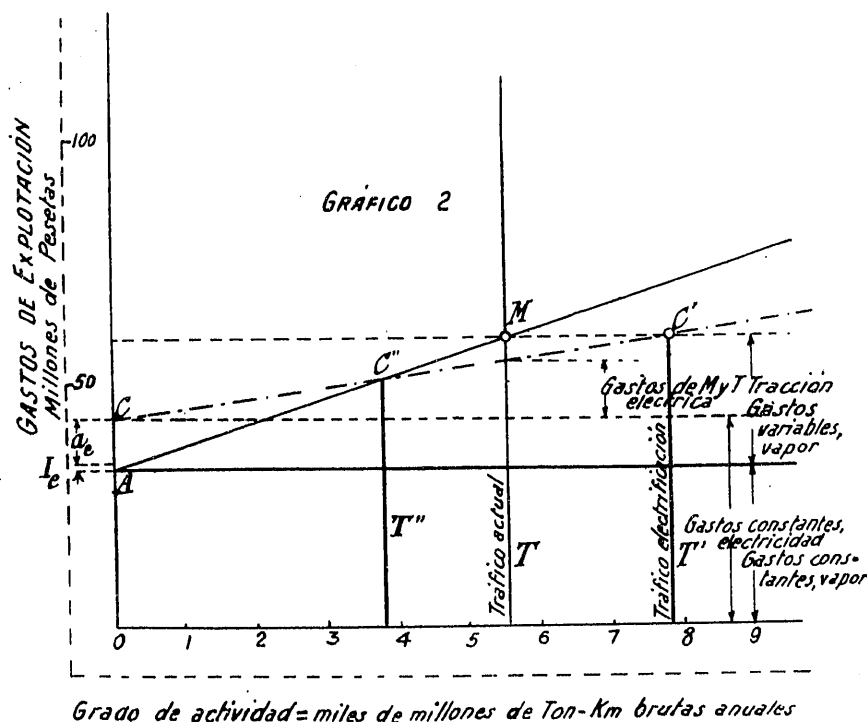
$$I_e = \text{coste de conservación de las instalaciones eléctricas} = 0,025 C_L + 0,0075 C_S^1$$

Sustituyendo, para cada ferrocarril dado, estos valores, se obtienen las rectas del tipo CC'' , y, por tanto, las posiciones I, II, III, ... del gráfico 1, la comprobación de la conveniencia económica, el valor del tráfico que, a iguales gastos de explotación, corresponde una vez electrificada la línea, y cuantas consecuencias hemos deducido antes en función del grado de actividad.

EJEMPLO

Para mostrar cómo en realidad puede llegarse a consecuencias concretas, todo lo inexactas o aproximadas que se quiera, pero que responden a una serie lógica de deducciones, aunque se basen en hipótesis más o menos admisibles, tomemos el ejemplo siguiente: Se trata de electrificar en la Compañía del Norte 1 630 km², propuestos por la Comisión ci-

tada, y deseamos comprobar: 1.º, la conveniencia económica de la electrificación; 2.º, el grado de actividad que para igualdad de gastos de explotación por vapor se alcanzaría una vez la línea electrificada; 3.º, tráfico mínimo económico.



DATOS:

$L = 1\,630$ km; $T = 5\,600\,000\,000$ de ton/km brutas anuales, adoptando como tráfico el medio del ejercicio 1927 y proporcional a la longitud a electrificar¹.
 $I = 9$; $r = 7$; $g = 0,06$; $g' = 0,05$ ²; $\rho = 0,85$; $\beta = 0,60$.
 $C_L = 35\,000 \times 1\,630 = 59\,000\,000$ de pesetas.

$$C_S = \frac{600\,000}{50} \times 1\,630 = 19\,560\,000 \text{ pesetas.}$$

Coste total electrificación = $A_e = 150\,000 \times 1\,630 = 244\,500\,000$ pesetas; gastos de explotación por vapor = los proporcionales a la longitud supuesta = 110 602 800 pesetas.

RESULTADOS (gráfico 2):

$A_e = 0,09 \times 244\,500\,000 = 22\,005\,000$ pesetas = anualidad de amortización e interés (9 por 100).

$I_e = 0,025 \times 59\,000\,000 + 0,0075 \times 19\,560\,000 = 1\,621\,700$ pesetas = conservación anual de instalaciones eléctricas.

$C_e = 11\,000\,000$ de pesetas.

$\lambda = T \times 0,00154^3 = 8\,624\,000$ pesetas.

Total gastos de Material y Tracción, 19 624 000 pesetas

1.º Conveniencia económica:

La recta AM (gráfico 2) representa los gastos totales del ferrocarril explotado por vapor. La $CC'C''$, ídem electrificado. La recta CC' cortando el tráfico actual T por bajo de M , la electrificación es conveniente, con el tráfico actual de 5 600 millones de ton/km, igual a 3 400 000 ton/km por kilómetro. La electrificación

¹ Nuevamente remitimos al lector a nuestros artículos de la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS ya citados, y especialmente al núm. 2 502, 1.º de junio de 1928, pág. 190.

² Madrid-Avila-Segovia, Miranda-Bilbao, Encina-Valencia, Miranda-Alsasua, Valencia-Tarragona, Manresa-Lérida, Santander-Mataporquera, Ujo-Gijón, Segovia-Medina, Zaragoza-Alsasua, Miranda-Castejón, Zaragoza-Lérida, Lérida-Reus-Tarragona, excepción hecha de los ramales de doble vía incluidos en este trazado, y que suman 206 km.

¹ El tráfico total bruto en ton/km, año 1927, fué de 12 653 390 010.

² Quizá por bajo de su coste actual; pero a dicho valor es evidente se llegará al efectuar las electrificaciones propuestas.

³ Valor deducido tomando el promedio de los gastos de Material y Tracción de la Compañía del Norte durante los años 1924-1927.

comienza a ser económica a partir del punto C'' , pues a los mismos gastos de explotación corresponderá mayor tráfico. El punto C' señala el tráfico para el cual se tendrían con la electrificación los mismos gastos anuales de Explotación.

2.º Tráfico T' :

Corresponde, como se ha dicho, al punto C' , y tiene por valor 8 660 millones de ton/km. Es decir, electrificando las líneas dichas, y con los mismos gastos que actualmente, se llegaría a tener un mayor tráfico y, por tanto, aumento de ingresos, aumento de beneficios netos.

3.º Tráfico mínimo económico:

Adoptando la electrificación se tendría el tráfico T' , cuyo valor es dado anteriormente.

Nota importante.—Para poner bien de manifiesto cómo los gastos de primer establecimiento de la electrificación influyen de un modo decisivo en la conveniencia de realizarla, supongamos que en lugar de tomar el 9 por 100 de interés y amortización del capital de dicho establecimiento, se toma el 10 por 100. En este caso, y en el mismo ejemplo anterior, resultaría:

1.º Conveniencia económica: No procede la electrificación, porque la recta CC' corta al tráfico T por encima de M . Para que la electrificación fuese económicamente conveniente, habría de tenerse un tráfico de 6 125 millo-

nes de ton/km brutas, anuales, mayor que el actual, 5.600 millones.

2.º A igualdad de gastos de explotación, con la electrificación sólo se llegaría a tener un tráfico de 5 000 millones de ton/km brutas, inferior al actual, consecuencia recíproca de la anterior.

Por tanto, si sólo con la variación de una unidad en el tanto por ciento supuesto como interés y amortización del capital del establecimiento eléctrico la electrificación deja de ser económica, la influencia del gasto A_e es decisiva en el estudio de las electrificaciones. Esto completa lo que dijimos anteriormente, y la necesidad de proceder en las electrificaciones, huyendo de lo que hemos llamado «electrificación acelerada».

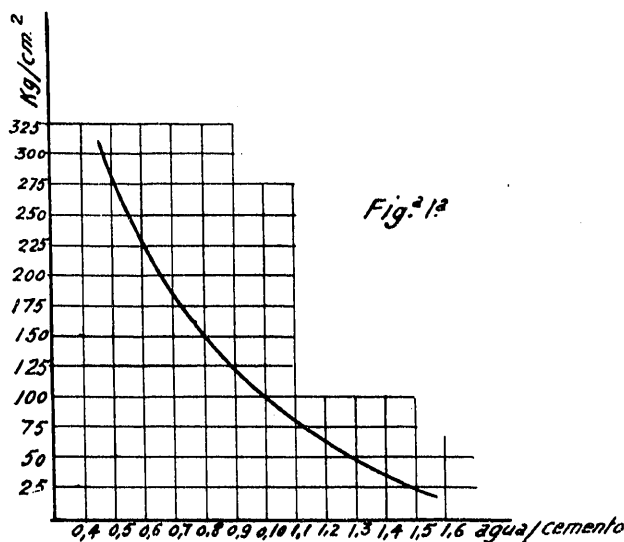
* * *

No creo necesario insistir, después de lo que tantas veces he dicho en la publicación de estos artículos, que nada definitivo se persigue, mejor dicho, nada que tenga el carácter de una rígida exactitud. Sólo se ha mostrado en lo que antecede un método general de investigación, generalidad que no excluye la deducción de consecuencias concretas, directamente aplicables a una explotación ferroviaria. El método, por otra parte, descubre, sin duda alguna, amplio camino para el estudio científico de las explotaciones ferroviarias, con o sin relación con la electrificación de ferrocarriles.

Francisco JIMÉNEZ ONTIVEROS
Ingeniero de Caminos

¿Cuál es la dosificación más económica para el hormigón?

Según las experiencias realizadas sobre las teorías de Abrams sabemos que la resistencia de un hormigón depende de la relación en volumen de agua y cemento. Por lo tanto, para conseguir un hormigón de una resistencia determinada no tenemos más que entrar en la curva (fig. 1.ª) que liga estas dos cantidades y de ella deducimos el valor de la relación



agua-cemento. Si, por otra parte, hemos dosificado el árido en la forma más conveniente, sólo nos queda, para fabricar el hormigón, mezclar el árido con la pasta de cemento. Según en las proporciones que ha-

gamos esta mezcla, el hormigón tendrá una consistencia distinta.

Si, por el contrario, lo que queremos es hormigón para una determinada clase de obra, por ejemplo, para hormigón armado, la consistencia ya viene fijada, pues en este caso habría de ser la pasta fluida. Si queremos conseguirla con una pasta de cemento que su relación agua-cemento sea muy pequeña, nos resultará que necesitamos una relación árido-cemento muy pequeña también, y si, por el contrario, la relación agua-cemento es grande, alcanzaremos una consistencia igual a la anterior con una relación árido-cemento mucho mayor.

Y de estos razonamientos surge el siguiente problema: Tenemos que construir una pieza que resista un cierto esfuerzo P , por compresión; si fijamos un hormigón de gran resistencia según la curva de la figura 1.ª, la relación agua-cemento será pequeña y la sección de la pieza tendrá un cierto valor S , también pequeño, y para que el hormigón nos dé una consistencia de 15 cm de aplastamiento, por ejemplo, necesitaremos una relación árido-cemento que ha de ser pequeña.

Si ahora fijásemos una resistencia menor que la anterior la relación agua-cemento será mayor, y al permanecer constante el esfuerzo, la sección S' de la pieza será también mayor; pero para conservar la consistencia de antes la relación árido-cemento puede ser también mayor, lo que naturalmente nos da una cantidad de cemento por unidad de volumen menor. Pero si la sección S' es mayor habrá mayor volumen de hormigón; por tanto, no sabemos, *a priori*, cuál es más económico, porque en el primer